

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARISA DANIELE SCHERER

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE
MICROALGAS CULTIVADAS EM FOTOBIORREATORES COMPACTOS
INDUSTRIAIS**

**CURITIBA
2015**

MARISA DANIELE SCHERER

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE
MICROALGAS CULTIVADAS EM FOTOBIORREATORES COMPACTOS
INDUSTRIAIS**

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção de grau de Doutor. Área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. José Viriato Coelho Vargas, Ph.D.
Co-orientador: Prof. André Bellin Mariano. D. Sc.

**CURITIBA
2015**

S326a

Scherer, Marisa Daniele

Avaliação do ciclo de vida (ACV) da produção de biodiesel de microalgas cultivadas em fotobiorreatores compactos industriais/ Marisa Daniele Scherer. – Curitiba, 2015.

161 f. : il. color. ; 30 cm.

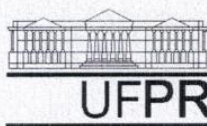
Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE, 2015.

Orientador: José Viriato Coelho Vargas – Co-orientador: André Bellin Mariano.

Bibliografia: p. 134-150.

1. Microalgas - Cultura e meios de cultura. 2. Biorreatores. 3. Biodiesel. 4. Ciclo de vida do produto. I. Universidade Federal do Paraná. II. Vargas, José Viriato Coelho. III. Mariano, André Bellin. IV. Título.

CDD: 665.37

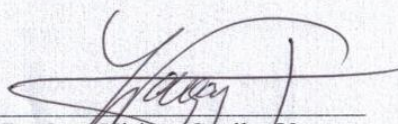


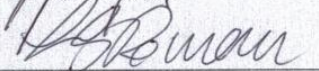
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais
Setor de Tecnologia

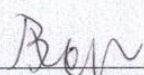
RELATÓRIO DE DEFESA DE TESE DE DOUTORADO

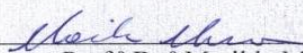
Aos onze dias do mês de maio de 2015, no Salão Nobre do Setor de Tecnologia - no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pela Prof.^a Dr.^a Ana Sofia C. M. de Oliveira, coordenadora do PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, a Banca Examinadora para a sexagésima nona defesa de tese de doutorado na área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais. Estiveram presentes no ato, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, foi constituída pelos professores doutores: José Viriato Coelho Vargas (UFPR), Marilda Munaro (UFPR), Lucimara Stolz Roman (UFPR), Emerson Dilay (UP), Vsévolod Mymrine (UTFPR). Às 09:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando a candidata **MARISA DANIELE SCHERER** a fazer a apresentação da tese de doutorado intitulada “**AValiação DO CICLO DE VIDA (ACV) DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE MICROALGAS CULTIVADAS EM FOTOBIORREATORES COMPACTOS INDUSTRIAIS.**” O referido trabalho teve a co-orientação do Prof. Dr. André Bellin Mariano. Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes. Tendo em vista a tese e a arguição, a banca decidiu pela APROVAÇÃO do candidato, (de acordo com a determinação dos artigos 68 e 69 da resolução 63/09 de 09.11.2009).

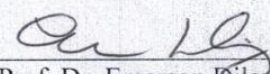
Curitiba, 11 de maio de 2015.

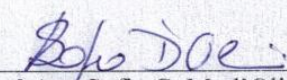

Prof. Dr. José Viriato Coelho Vargas
Orientador


Prof.^a Dr.^a Lucimara Stolz Roman
Examinador


Prof. Dr. Vsévolod Mymrine
Examinador


Prof.^a Dr.^a Marilda Munaro
Examinador


Prof. Dr. Emerson Dilay
Examinador


Prof.^a Dr.^a Ana Sofia C. M. d'Oliveira
Coordenadora do PIPE

Pai... (In memoriam)
Foi vendo você que eu aprendi a lutar.
Mas eu só quero lembrar, que se Deus me
desse uma chance de viver outra vez,
eu só queria se tivesse você.
O seu nome sempre é lembrado, converso e
falo de você sempre na oração.
(Lucas Lucco).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado ao longo de toda jornada acadêmica saúde, coragem, força, ânimo, perseverança e, acima de tudo, a sabedoria necessária para chegar até aqui.

Aos meus amados pais, Almiro Arnaldo Scherer (In memoriam) e Silvia Koch Scherer, pelo exemplo de dedicação e amor a família, os quais sempre me incentivaram a estudar e a nunca desistir dos meus sonhos. Agradeço a eles por ter me dado à oportunidade de sempre continuar estudando, oportunidade esta, que agora se reflete na conclusão da pós-graduação. Pela confiança e pelo amor que me fortalece todos os dias.

Pela confiança em mim, pelo respeito para comigo, pelos conhecimentos que comigo compartilharam, e principalmente, pela orientação, agradeço aos Professores. Dr. José Viriato Coelho Vargas e Dr. André Bellin Mariano.

Meu agradecimento mais que especial por todo conhecimento sobre a Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida que a professora Dra. Cássia Maria Lie Ugaya compartilhou todo esse período do doutorado, me auxiliando e me dando todo direcionamento necessário para a conclusão desse trabalho, sem ela não seria possível ter chegado até aqui.

Agradeço a banca de defesa de projeto, qualificação e defesa, pois tenho certeza que todas as discussões que foram levantadas fizeram melhorar e engrandecer o trabalho.

Ao meu ex orientador de mestrado que hoje posso chamar de amigo Anderson Caires, por todos os conselhos e por sempre manter as portas abertas para meu retorno ao grupo GOA (UFGD).

Ao meu lindo Diego Maffi por ter vivenciado comigo passo a passo deste trabalho, por ter me dado todo o apoio que necessitei nos momentos difíceis, todo carinho, respeito, e por tornar minha vida cada dia mais feliz, muito obrigada.

Aos demais da família por ter me incentivado nas minhas decisões e por ter sempre me cativado a estudar. Agradeço também aos meus amigos, os quais nunca me deixaram na mão, irmãos que Deus me deixou escolher e preservar.

Aos amigos e colegas do NPDEAS pela companhia nesses meses, pelas risadas e pelos conhecimentos compartilhados, em especial aos meus amigos Osmar, Amanda, Elaine, Tallita, Wellington, Luiza, Nelson, Diego, Beatriz, Jacqueline, Sakuma, Pinnola, Pedro, Bruno e Paolla pela ajuda. Aos secretários do PIPE Edson e Cláudia por apoio sempre.

Finalmente, agradeço a todos aqueles que de uma forma direta ou indireta me ajudaram a chegar até aqui.

*“Cada sonho que você deixa para trás, é um
pedaço do seu futuro que deixa de existir”*
STEVE JOBS

PRODUÇÃO CIENTÍFICA

- **Trabalho publicado em Journal ISI - Fator de Impacto: 4.248**

SILVA, A.; CARTER, R.; MERSS, F.; CORRÊA, D.; VARGAS, J.V.C.; MARIANO, A.B.; ORDONEZ, J.; SCHERER, M.D. Life cycle assessment of biomass production in microalgae compact photobioreactors. GCB Bioenergy (2015) 7, 184–194, doi: 10.1111/gcbb.12120.

- **Trabalho aceito em Journal B4 - RETERM ISSN 1676-1790**

Paper Submission Number: 338-2015. Paper: "Energy analysis of lipid extraction of *Scenedesmus* sp. produced in pilot scale", by LUIZA SCHROEDER, MARISA DANIELE SCHERER, WELLINGTON. BALMANT, JOSÉ VIRIATO COELHO VARGAS e ANDRÉ BELLIN MARIANO.

- **Trabalho submetido Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental ISSN 1413 - 4152**

Paper Submission Number: 140167. Paper: "Avaliação ambiental preliminar do cultivo de microalgas em tanque de cloreto de polivinila de baixo custo comparado com fotobiorreator compacto através da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)", by Scherer, M.D., Olivera, A.C., Mariano, A.B., Vargas, J.V.C.

- **Anais de Congressos Internacionais**

SCHROEDER, L.; OLIVEIRA, C. B.; SCHERER, M.D.; Vargas, J.V.C.; Mariano, A.B. Microalgae Fatty Acid Extraction From Wet Biomass. In: International Congress of Mechanical Engineering, 2013, Ribeirão Preto. In: International Congress of Mechanical Engineering. Anais: CD-ROM, 2013. v. 22. p. 1615-1623.

SCHERER, M.D.; OLIVEIRA, A. C.; UGAYA, C. M. U.; MARIANO, A.B.; VARGAS, J.V.C. Preliminary Enviromental Assement of the Cultivation of Microalgae Agroindustrial Residue. In: International Congress of Mechanical Engineering, 2013, Ribeirão Preto. In: International Congress of Mechanical Engineering. Anais: CD-ROM, 2013. v. 22. p. 1397-1405.

SCHERER, M. D.; OLIVEIRA, A. C.; MARIANO, A.B.; VARGAS, J.V.C. Inventário e ACV Preliminar do Cultivo de Microalgas em Tanque de PVC de Baixo Custo Comparado com Fotobiorreator Compacto.. In: 7º Congresso Internacional de Bioenergia, 2012, São Paulo. Anais: CD-ROM, 2012. v. 7. p. 1-6.

OLIVEIRA, A. C.; SCHERER, M. D.; Vargas, J.V.C.; Mariano, A.B. Cultivo de Microalgas em Resíduo de Biodigestor para Produção de Biodiesel. In: 7º Congresso Internacional de Bioenergia, 2012, São Paulo. Anais: CD-ROM, 2012. v. 7. p. 1-6.

SCHERER, M. D.; SCHROEDER, L.; BALMANT, W.; SELESU, N.F.H.; MARIANO, A.B.; VARGAS, J.V.C. Modeling and simulation of the saponification process of microalgal biomass for fatty acids production. In: 14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 2012, Rio de Janeiro. BOOK OF ABSTRACTS, 2012. v. 14. p. 32-32.

SCHROEDER, L.; ZAIA, L.L.; SCHEMBERGER, A.S.; SCHERER, M. D.; VARGAS, J.V.C.; MARIANO, A.B. Produção de Biodiesel de Microalgas a partir da Hidrólise Alcalina da Biomassa Úmida. In: 6º Congresso Internacional de Bioenergia, 2011, Curitiba. Anais: CD-ROM. Curitiba, 2011. p. 1-6.

SCHERER, M.D.; OLIVEIRA, A. C.; MARIANO, A.B.; VARGAS, J.V.C. Biofixação de CO₂ e produção de biomassa de microalgas em fotobiorreatores. In: IV Latin American Congress of Algae Biotechnology & Workshop of the National Network of Marine Algae Biotechnology, 2013, Florianópolis. Anais: Pen Drive. Florianópolis: Rede Algas, 2013. v. IV. p. 260-260.

ZAIA, L.; SCHROEDER, L.; SCHERER, MARISA D.; VARGAS, J.V.C.; MARIANO, A.B. Processos Químicos com microalgas com vistas a produção de biodiesel no Núcleo de pesquisa e desenvolvimento em energia autossustentável (NPDEAS). In: XIX JORNADAS DE JÓVENES INVESTIGADORES, 2011, Ciudad del Este. XIX JORNADAS DE JÓVENES INVESTIGADORES, 2011.

- **Anais de Congressos Nacionais**

SCHERER, M. D.; Balmant, W.; Schroeder, L.; Mariano, A.B.; Vargas, J.V.C. Modelagem e simulação do processo de obtenção de ácidos graxos de microalgas via hidrólise alcalina da biomassa úmida variando concentração de NaOH. In: 5º Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel e o 8º Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras e Biodiesel, 2012, Salvador. Anais Científicos, 2012.

SCHROEDER, L.; FRAGA, G. L. L.; SELESU, N.F.H.; SCHERER, M. D.; MARIANO, A.B.; VARGAS, J.V.C. Processo alternativo para obtenção de material graxo de microalgas cultivadas em fotobiorreatores com vistas à produção de biodiesel. In: 5º Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel e o 8º Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras e Biodiesel, 2012, Salvador. Anais Científicos, 2012.

OLIVEIRA, A. C.; SCHERER, M.D.; MARIANO, A.B.; VARGAS, J.V.C. Cultivo de microalgas em efluente da bovinocultura visando à produção de biomassa e a biorremediação de águas degradadas. In: IV Latin American Congress of Algae Biotechnology & Workshop of the National Network of Marine Algae Biotechnology, 2013, Florianópolis. Anais: Pen Drive. Florianópolis: Rede Algas, 2013. v. IV. p. 103-103.

RESUMO

Este estudo avaliou a sustentabilidade do modelo de produção de biodiesel de microalgas cultivadas em fotobiorreatores (FBRs) compactos industriais no Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável (NPDEAS) utilizando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). O sistema de produção foi dividido em: i) montagem dos sistemas de cultivo; ii) cultivo das microalgas; iii) recuperação da biomassa; iv) extração dos ácidos graxos e; v) conversão em biodiesel de microalgas. Em comparação aos sistemas de cultivos abertos, o FBR apresentou menores impactos quanto à acidificação (AC) em 7,18% e depleção da camada de ozônio (DCO) em 42,53%. Outra vantagem encontrada dos FBRs consiste no uso do solo, visto que nas condições avaliadas os FBRs utilizam uma área 3,4 vezes menor que os sistemas abertos para produção da mesma quantidade de biodiesel estudada (25 litros). Em relação às demais etapas analisadas, os melhores desempenhos ambientais segundo o uso dos Métodos CML 2000 e Eco-Indicator 99 consistem em: cultivo com meios alternativos em substituição aos nutrientes sintéticos, recuperação da biomassa com floculante NaOH e acoplamento de operações unitárias, extração dos ácidos graxos por saponificação e produção do biodiesel por via enzimática. As vantagens correspondem às reduções dos impactos ambientais pela substituição dos nutrientes sintéticos por efluentes da suinocultura em 60,41% para ecotoxicidade de água doce (EAD), 79,45% para ecotoxicidade de água marinha (EAM), também para o potencial de aquecimento global (PAG) e eutrofização (EU) o cultivo com efluente da suinocultura gerou um crédito deixando de emitir $1,24\text{E}+11 \text{ KgCO}_{2\text{eq.}}$ e $7,03\text{E}+04 \text{ KgPO}_{4\text{eq.}}$, ou seja, reduziu em 100% os impactos quando comparados com o nutriente sintético. Para a recuperação da biomassa, o NaOH apresentou menores emissões em praticamente todas as categorias analisadas, exceto para depleção abiótica (DA) e ecotoxicidade terrestre (ET), no entanto, foi considerado o agente floculante padrão dessas análises, uma vez que promoveu a coagulação com valores tão eficientes quanto 93,5%, apresentou o melhor perfil ambiental entre os agentes floculantes estudados, juntamente com o acoplamento de tecnologias de floculação e centrifugação para obtenção da biomassa úmida e floculação e secagem térmica para biomassa seca. Dentre os métodos de extração dos ácidos graxos avaliados, a saponificação apresentou menores emissões em praticamente todas as categorias comparado com a extração a quente, dando destaque para reduções em DA (92,35%) e DCO (93,56%). Na esterificação enzimática dos ácidos graxos obtidos por extração a quente, notou-se menores emissões em torno de 50% em todas as categorias de impacto analisadas. Em comparação aos biodieseis tradicionais como soja, palma e canola, o de microalgas apresentou um melhor perfil ambiental para as categorias toxicidade humana (TH) e EU, e quando comparado com o biodiesel de soja, também para oxidação fotoquímica (OF). Portanto, após a avaliação de todas as etapas do processo de produção de biodiesel no NPDEAS, o uso da metodologia de ACV mostrou que o biodiesel de microalgas tem potencial de apresentar um desempenho ambiental superior em comparação com algumas culturas terrestres. Além disso, os resultados deste trabalho fornecem as bases para o desenvolvimento continuado deste trabalho pelo grupo de pesquisa no NPDEAS para o aprimoramento da tecnologia para a produção de biodiesel de microalgas em escala industrial de forma sustentável.

Palavras-chave: Microalgas, Fotobiorreatores, lagoas abertas, biodiesel, Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

ABSTRACT

This study evaluated the sustainability of microalgae biodiesel production model grown in industrial compact photobioreactors (PBRs) at the Center for Research and self-sustaining Energy Development (NPDEAS) using the Life Cycle Assessment methodology (LCA). The production system has been divided into: i) farming systems mounting; ii) microalgae culturing; iii) biomass recovering; iv) fatty acids extraction and; v) conversion to biodiesel microalgae. Compared to open cultivation systems, the FBR had smaller impacts regarding to acidification (AC) in 7.18% and depletion of the ozone layer (DCO) at 42.53%. Another advantage of FBRs is found in land use, since under the evaluated conditions the FBRs use an area 3.4 times smaller than the open systems to produce the same amount of biodiesel studied (25 liters). Concerning other steps analyzed, the best environmental performance according to the use of methods CML 2000 and Eco-Indicator 99 consist of: cultivation with alternative means to replace synthetic nutrients, recovery of biomass with flocculant NaOH and coupling unit operations, extraction of fatty acids by saponification and enzymatic production of biodiesel. The benefits correspond to reductions in environmental impact by replacing the synthetic nutrients by effluent from swine farming in 60.41% for freshwater ecotoxicity (EAD), 79.45% for seawater ecotoxicity (EAM), also for the global warming potential (PAG) and eutrophication (EU) with the cultivation of swine effluent generated a credit by not emitting $1.24\text{E}+11 \text{ KgCO}_{2\text{eq.}}$ and $7.03\text{E}+04 \text{ KgPO}_{4\text{eq.}}$, i.e., reduced by 100% compared to the synthetic nutrient impacts. For the recovery of the biomass, the NaOH had lower emissions in virtually all categories examined, except for abiotic depletion (DA) and Earth ecotoxicity (ET), however, it was considered the standard flocculating agent of these analyses, since it promoted coagulation with values as efficient as 93.5%, showed the best environmental profile of the flocculating agents studied, together with the coupling of flocculation and centrifugation technologies to obtain wet biomass and flocculation and thermal drying to dry biomass. Considering the methods of the assessed fatty acids extraction, saponification had lower emissions in almost all categories compared to the hot extraction, highlighting reductions in CA (92.35%) and DCO (93.56%). In enzymatic esterification of fatty acids obtained by hot extraction, it was noted about 50% lower emissions in all impact categories analyzed. Compared to traditional biodiesels as soy, palm and canola, the microalgae showed a better environmental profile for human toxicity (TH) and EU categories, and when compared to soy biodiesel, the same for photochemical oxidation (OF). Therefore, after the evaluation of all stages of biodiesel production process in NPDEAS, the use of LCA methodology has shown that microalgae biodiesel has the potential to deliver superior environmental performance in comparison to some land crops. In addition, the results of this study provide the basis for the continued development of this work by the research group at NPDEAS in improving technology for microalgae biodiesel production on an industrial scale in a sustainable way.

Keywords: Microalgae, photobioreactors, open ponds, biodiesel, Life Cycle Assessment (LCA).

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 -	Diagrama esquemático do processo de obtenção de biodiesel a partir da biomassa de microalgas em escala piloto no NPDEAS.....	21
FIGURA 2.1 -	Reações de transesterificação e esterificação.....	24
FIGURA 2.2 -	Distribuição percentual das matérias-primas utilizadas no Brasil como fonte oleagionosa para produção de biodiesel.....	26
FIGURA 2.3 -	Microalgas do gênero <i>Scenedesmus</i>	30
FIGURA 2.4 -	A: Cultivo de microalgas em tanques aerados em Kona, Havaí, EUA. B: Cultivo de microalgas em fotobiorreator tubular inclinado. C: Cultivo de microalgas em escala laboratorial.....	34
FIGURA 2.5 -	Esquema da primeira lagoa aberta para cultivo de microalgas do tipo raceway.....	34
FIGURA 2.6 -	Exemplos de sistemas abertos para produção de microalgas. (a) produção de <i>Dunaliella salina</i> em lagoas abertas na Austrália. (b) sistema raceway, cultivo de <i>Spirulina</i> nos EUA. (c) lagoa circular para produção de <i>Chlorella</i> em Taiwan. (d) produção de <i>Nannochloropsis</i> para aquicultura...	36
FIGURA 2.7 -	Sistemas fechados (fotobiorreatores); (a) produção de <i>Chlorella</i> em fotobiorreator em casa de vegetação na Alemanha; (b) cultivo em fotobiorreator industrial ao ar livre em Israel; (c) cultivo experimental em fotobiorreator no MIT; (d) Oilgae; (e) Cultivo de <i>Scenedesmus</i> sp. no NPDEAS.....	37
FIGURA 2.8 -	Arranjo geométrico dos tubos transparentes utilizados nos fotobiorreatores compactos do NPDEAS.....	39
FIGURA 2.9 -	Opções tecnológicas para recuperação da biomassa de microalgas.....	40
FIGURA 2.10 -	Mecanismo de saponificação dos triacilglicerídeos.....	46
FIGURA 2.11 -	Mecanismo de esterificação dos ácidos graxos.....	48
FIGURA 2.12 -	Fases de uma ACV	50
FIGURA 4.1 -	Limite do sistema e descrição dos processos do modelo de produção de biodiesel de microalgas estudado.....	71
FIGURA 4.2 -	Ilustração do sistema de cultivo em lagoa aberta com suporte para cobertura plástica.....	74
FIGURA 4.3 -	Etapas do processo de montagem e funcionamento do FBR tubular compacto do NPDEAS.....	75
FIGURA 4.4 -	Micrografia (aumento de 100 vezes em óleo de imersão) do "mix" de microalgas com predominância da <i>Scenedesmus</i> sp.	77
FIGURA 4.5 -	Esquema de diluição do fotobiorreator.....	78
FIGURA 4.6 -	O aspecto da biomassa obtida após filtragem simples	83
FIGURA 4.7 -	Biomassa de microalgas no cesto da centrifuga durante processo de separação via centrifugação e seu aspecto.....	84
FIGURA 4.8 -	Secagem térmica da biomassa microalgal e o aspecto após a secagem.....	84
FIGURA 4.9 -	Acoplamento de tecnologias para a recuperação da biomassa	85

FIGURA 4.10 -	Reator encamisado utilizado para extração piloto.....	89
FIGURA 5.1 -	Análise comparativa da etapa de montagem do FBR e da lagoa aberta	95
FIGURA 5.2 -	Contribuição dos impactos ambientais na etapa de montagem do FBR através do método CML 2000.....	96
FIGURA 5.3 -	Contribuição individual do aço para a ecotoxicidade terrestre.	97
FIGURA 5.4 -	Contribuição individual do aço para a ecotoxicidade de água doce.....	98
FIGURA 5.5 -	Contribuição individual do cimento para o potencial de aquecimento global.....	99
FIGURA 5.6 -	Contribuição dos impactos ambientais na etapa de montagem do FBR através do método E-I99 para uso da terra.....	100
FIGURA 5.7 -	Projeção da produção de biodiesel de palma e microalgas (estas cultivadas em lagoas aberta e fotobiorreator, considerando 20 % óleo (v/v) na biomassa seca. Densidade de biodiesel assumida de 800 kg m^{-3}).....	101
FIGURA 5.8 -	Avaliação ambiental dos cultivos das microalgas considerando as duas fontes nutricionais.....	102
FIGURA 5.9 -	Perfil ambiental dos agentes flocculantes considerados no trabalho.....	106
FIGURA 5.10 -	Contribuição individual do NaOH para o potencial de depleção abiótica.....	108
FIGURA 5.11 -	Contribuição individual do NaOH para o potencial de ecotoxicidade terrestre.....	108
FIGURA 5.12 -	Impactos ambientais das tecnologias de recuperação da biomassa utilizada no NPDEAS.....	110
FIGURA 5.13 -	Avaliação individual de cada tecnologia utilizada no NPDEAS para a recuperação da biomassa microagal.....	112
FIGURA 5.14 -	Comparação dos cenários de recuperação da biomassa.....	113
FIGURA 5.15 -	Impactos ambientais dos processos de extração dos ácidos graxos	115
FIGURA 5.16 -	Contribuição dos impactos ambientais na etapa de extração dos ácidos graxos através da saponificação.....	116
FIGURA 5.17 -	Contribuição dos impactos ambientais na etapa de extração dos ácidos graxos através da extração a quente.....	118
FIGURA 5.18 -	Impactos ambientais dos processos de esterificação enzimática dos ácidos graxos.....	120
FIGURA 5.19 -	Avaliação individual da esterificação dos ácidos graxos extraídos através a metodologia de saponificação.....	121
FIGURA 5.20 -	Avaliação individual da esterificação dos ácidos graxos extraídos através a metodologia de extração a quente.....	122
FIGURA 5.21 -	Comparação da montagem do FBR com tubos transparentes de PVC e de vidro.....	123
FIGURA 5.22 -	Comparação da extração do óleo de microalgas utilizando o ácido acético e o ácido sulfúrico.....	125
FIGURA 5.23 -	Gráfico de fluxos do sistema com opções a cada etapa do processo de produção do biodiesel de microalgas. O caso favorável ambientalmente está realçado em verde.....	126
FIGURA 5.24 -	Comparação ambiental da produção dos biodieseis de	

	microalgas, soja, canola e palma.....	128
FIGURA 5.25 -	Avaliação individual do melhor cenário da produção de biodiesel de microalgas no NPDEAS.....	130

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 -	Alguns produtos de alto valor agregado das microalgas e suas, aplicações (Fonte: Modificado de Becker, 1994).....	28
TABELA 2.2 -	Produtividade em biodiesel de matérias-primas tradicionais em comparação ao potencial de produção das microalgas (Fonte: Modificado de Mata et al., 2010).....	29
TABELA 2.3 -	Teor lipídico encontrado em diferentes espécies da microalga do gênero <i>Scenedesmus</i>	31
TABELA 2.4 -	Vantagens e desvantagens do processo químico e enzimático na produção de biodiesel.....	48
TABELA 2.5 -	Categorias de impacto do método CML 2000.....	53
TABELA 2.6 -	Categorias de impacto do método Eco-Indicator 99.....	54
TABELA 2.7 -	Características gerais dos principais trabalhos disponíveis sobre ACV do biodiesel de microalgas.	57
TABELA 4.1 -	Resumo das entradas e saídas do processo de montagem dos sistemas de cultivo.....	76
TABELA 4.2 -	Quantidade de nutrientes utilizados no cultivo de microalgas para o meio Chu.....	79
TABELA 4.3 -	Composição do efluente suíno biodigerido.....	79
TABELA 4.4 -	Resumo das entradas e saídas da etapa de cultivo das microalgas	81
TABELA 4.5 -	Resumo das entradas e saídas da etapa de recuperação da biomassa	87
TABELA 4.6 -	Resumo dos parâmetros operacionais da etapa de extração dos ácidos graxos.....	90
TABELA 4.7 -	Resumo dos parâmetros operacionais para reação enzimática dos ácidos graxos em biodiesel de microalgas.....	91
TABELA 5.1 -	Quantificação das emissões pelo Método CML 2000 para a montagem dos sistemas de cultivo.....	95
TABELA 5.2 -	Quantificação dos impactos ambientais pelo Método Eco-Indicator 99 para ocupação de área dos sistemas de cultivos....	101
TABELA 5.3 -	Quantificação das emissões pelo Método CML 2000 para a etapa de cultivo das microalgas.....	103
TABELA 5.4 -	Comparativo das eficiências dos agentes flocculantes testados	105
TABELA 5.5 -	Quantificação das emissões pelo Método CML 2000 para a etapa de recuperação da biomassa através de agentes flocculantes.....	107
TABELA 5.6 -	Quantificação das emissões pelo Método CML 2000 para a etapa de recuperação da biomassa considerando as tecnologias testadas no NPDEAS.....	111
TABELA 5.7 -	Quantificação das emissões pelo Método CML 2000 para a etapa de extração dos ácidos graxos.....	116
TABELA 5.8 -	Quantificação das emissões pelo Método CML 2000 para a esterificação enzimática dos ácidos graxos.....	120

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	-	Acidificação
ACV	-	<i>Life Cycle Assessment</i> (Avaliação do Ciclo de Vida)
AICV	-	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
ANP	-	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CH	-	Suíça
CML	-	<i>Center of Environmental Science of Leiden University</i>
DA	-	Depleção abiótica
DALY	-	Números de anos perdidos mais números de anos com incapacidade
DBO	-	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DCO	-	Depleção da camada de ozônio
DQO	-	Demanda Química de Oxigênio
EAD	-	Ecotoxicidade de recursos de água doce
EAM	-	Ecotoxicidade de recursos de água marinha
E-I99	-	Eco-Indicator 99
EN 14103	-	<i>Deutsches Institut Für Normung</i> (Instituto Alemão de Normalização)
EPA	-	<i>U.S. Environmental Protection Agency</i> (Agência Ambiental Norte-Americana)
ET	-	Ecotoxicidade terrestre
EU	-	Eutrofização
FBR	-	Fotobiorreator
FEA	-	Forno elétrico a arco
FFA	-	Ácido conjugado
ft ³ /min.	-	Pés cúbicos por minuto
GEE	-	Gases de Efeito Estufa
Hg	-	Mercúrio
IPCC	-	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental de Mudança Climática)
ISO	-	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Padronização)
Kg C ₂ H _{2eq.}	-	Quilo de acetileno equivalente
kg CFC ⁻¹¹ _{eq.}	-	Quilo de tricloromonofluormetano equivalente

kg CO _{2eq.}	-	Quilo de dióxido de carbono equivalente
Kg DCB _{eq.}	-	Quilo de diclorometano equivalente
kg PO _{4eq.}	-	Quilo de fosfatos equivalente
Kg Sb _{eq.}	-	Quilo de antimônio equivalente
kg SO _{2eq.}	-	Quilo de dióxido de enxofre equivalente
LACAUT	-	Laboratório de Análises de Combustíveis Automotivo
MJ surplus	-	Energia necessária para extração dos recursos minerais e combustíveis
MY	-	Malásia
NPDEAS	-	Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável
OF	-	Oxidação fotoquímica
OMS	-	Organização Mundial da Saúde
p	-	Unidade
PAG	-	Potencial de aquecimento global
PC	-	Policarbonato
PDF*m ² yr	-	<i>Potentially Disappeared Fraction</i> ou Fração potencialmente desaparecida em m ² (ano kg de emissão) ⁻¹
PU	-	Poliuretano
PVC	-	Cloreto de Polivinila
REL	-	Retorno de Energia Líquida
rpm	-	Rotação por minuto
SETAC	-	<i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i>
TAG	-	Triacilglicerídeos
TH	-	Toxicidade humana
tkm	-	Unidade de transporte (Tonelada x quilômetro)
ton.	-	Tonelada
UE	-	União Européia
UF	-	Unidade Funcional

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO	19
1.2 ORGANIZAÇÃO DA TESE	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 BIODIESEL	23
2.2 MATÉRIAS-PRIMAS PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL	25
2.2.1 Microalgas como matéria-prima para produção de biodiesel	27
2.2.1.1 Gênero <i>Scenedesmus</i>	30
2.3 MEIOS NUTRICIONAIS PARA AS MICROALGAS	31
2.3.1 Meio sintético	31
2.3.2 Meio alternativo	32
2.4 SISTEMAS DE CULTIVO DAS MICROALGAS	33
2.4.1 Sistemas abertos	34
2.4.2 Sistemas fechados	36
2.4.2.1 Fotobiorreatores compactos do NPDEAS	38
2.5 RECUPERAÇÃO DA BIOMASSA	39
2.5.1 Floculação	40
2.5.2 Filtragem	42
2.5.3 Centrifugação	43
2.5.4 Secagem térmica	44
2.6 EXTRAÇÃO DOS ÁCIDOS GRAXOS DAS MICROALGAS	45
2.6.1 Extração dos ácidos graxos por saponificação seguida de acidificação	46
2.7 CONVERSÃO DOS ÁCIDOS GRAXOS EM BIODIESEL	47
2.8 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)	49
2.8.1 Fronteiras do sistema	50
2.8.2 Unidade funcional (UF)	51
2.8.3 Inventário dos dados do ciclo de vida	51
2.8.4 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)	52
2.8.4.1 Método CML 2000	52
2.8.4.2 Eco-Indicator 99	53
2.9 CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO	54

2.10 INTERPRETAÇÃO E OPORTUNIDADE DE MELHORIAS	55
2.11 ESTUDOS DE ACV DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE MICROALGAS	56
2.12 DESAFIOS	67
3 OBJETIVOS	69
3.1 OBJETIVO GERAL.....	69
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	69
4 METODOLOGIA.....	70
4.1 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) EMPREGADO	70
4.1.1 Fronteiras do sistema e identificação das etapas do sistema de produção de biodiesel no NPDEAS.....	70
4.1.2 Unidade funcional.....	72
4.1.3 Inventário dos dados do ciclo de vida (ICV)	72
4.1.4 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)	73
4.2 IDENTIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DO SISTEMA DE PRODUÇÃO DO BIODIESEL DE MICROALGAS E QUANTIFICAÇÃO DOS FLUXOS DE ENTRADA E SAÍDA	73
4.2.1 Montagem dos sistemas de cultivo	74
4.2.2 Cultivo das microalgas	77
4.2.2.1 Meios de cultivo	78
4.2.3 Recuperação da biomassa.....	82
4.2.4 Extração do óleo e obtenção do biodiesel de microalgas	88
4.3 CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS E IDENTIFICAÇÃO DAS OPORTUNIDADES DE MELHORIA NO SISTEMA ATRAVÉS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	92
4.4 IDENTIFICAÇÃO E COMPARAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE MICROALGAS DO NPDEAS COM OS BIODIESEIS A BASE DE SOJA, PALMA E CANOLA	92
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	94
5.1 ACV COMPARATIVA DAS ETAPAS DA PRODUÇÃO DO BIODIESEL NO NPDEAS.....	94
5.1.1 Montagem dos sistemas de cultivo - lagoa aberta <i>versus</i> fotobiorreator compacto	94
5.1.2 Comparação dos cultivos das microalgas com meio sintético e com meio alternativo.	102
5.1.3 Análises dos cenários de recuperação da biomassa de microalgas no NPDEAS	105
5.1.3.1 Determinação do melhor agente floculante	105

5.1.3.2 Análise ambiental das tecnologias consideradas para a recuperação da biomassa	109
5.1.3.3 Análise dos cenários considerados para a recuperação da biomassa.....	113
5.1.4 Métodos de extração dos ácidos graxos das microalgas.....	114
5.1.5 Conversão dos ácidos graxos em biodiesel pela esterificação enzimática	119
5.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E IDENTIFICAÇÃO DA OPÇÃO MAIS ADEQUADA PARA CADA ETAPA DO PROCESSO ESTUDADO	122
5.3 COMPARAÇÃO DO MELHOR CENÁRIO DA PRODUÇÃO DO BIODIESEL DE MICROALGAS NO NPDEAS COM BIODIESEIS DE OUTRAS FONTES	127
6 CONCLUSÕES.....	131
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	133
REFERÊNCIAS	134
APÊNDICES	151
ANEXO.....	156

1 INTRODUÇÃO

Esta seção discorre sobre o tema a ser desenvolvido nesta tese de doutorado, e inicialmente será abordada a motivação que levou ao seu desenvolvimento e posteriormente neste documento, à estrutura apresentada nos capítulos subsequentes.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

A preocupação mundial sobre a disponibilidade dos recursos energéticos para os próximos anos está fundamentada nas questões da segurança energética nacional, estabilidade econômica e sustentabilidade ambiental (SING e OLSEN, 2011). Ao longo dos anos, verificou-se que a demanda por combustíveis fósseis é crescente, além dos efeitos ambientais de seu uso em atividades industriais de geração de energia e de transporte, aliado a uma forte expectativa de um futuro desabastecimento de petróleo, são responsáveis pelo crescente número de pesquisas em busca de energias alternativas.

As produções de biocombustíveis a partir de culturas convencionais, como milho e soja, resultam em inúmeros desafios de sustentabilidade, particularmente no que diz respeito ao consumo de água, uso do solo, fertilizantes e aplicação de pesticidas. O uso dessas matérias-primas para produção de biodiesel é controverso, pois o processamento e a comercialização dos biocombustíveis terrestres estão associados com vários problemas ambientais e sociais, incluindo a perda da biodiversidade, o aumento do consumo de água doce, os preços mais elevados de plantas participantes da cadeia alimentar e o aumento das desigualdades sociais.

Embora várias matérias-primas tenham sido testadas como fontes para produção do biodiesel, alternativamente, as microalgas surgem como uma matéria-prima promissora para a produção de biodiesel de terceira geração, onde diversos autores comprovaram seu potencial no que diz respeito à produtividade em biomassa e teor de óleo, independente do uso energético (MAYFIELD, 2008).

As microalgas podem prover vários tipos diferentes de biocombustíveis renováveis. Dentre eles estão o biodiesel derivado do óleo da microalga (SATYANARAYANA et al., 2011), o metano produzido da digestão anaeróbia da biomassa de microalga (SPOLAORE et al., 2006), e o hidrogênio produzido por fotólise na etapa fotoquímica da fotossíntese (MELIS e MATTHEW, 2006).

Segundo Chisti (2007) a produtividade de óleo de muitas microalgas é superior à de plantações de oleaginosas terrestres, com potencial para substituir completamente o diesel fóssil, e as microalgas além do seu elevado teor de óleo, sua produção não implica na diminuição da produção de alimentos, uma vez que não exige terras cultiváveis. Como características principais as microalgas são microrganismos fotossintéticos que utilizam energia solar associada com água e dióxido de carbono (CO_2) para produzir biomassa.

O cultivo de microalgas pode ser realizado tanto pelo processo fototrófico quanto heterotrófico, em cultivos fototróficos, as microalgas são cultivadas em dois tipos de sistemas: tanques abertos e fotobiorreatores (FBR). Este último é um sistema fechado e o mais adequado para cultivo industrial de microalgas, pois em cultivos abertos as mesmas podem ser rapidamente contaminadas por outros microrganismos (BRENNAN; OWENDE, 2010).

Pesquisas na última década focaram em projetos de fotobiorreatores compactos verticais com tubos de cloreto de polivinila (PVC) que são considerados a evolução das lagoas abertas, que eram sinônimos de baixas taxas de produtividade e ocupação de grandes áreas para seu cultivo (VARGAS, 2007).

E a fim de avaliar o impacto ambiental e viabilidade de tais empreendimentos dessa tecnologia para o biodiesel de microalgas, a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi selecionada para avaliar o desempenho ambiental destes sistemas, pois é uma ferramenta amplamente usada para identificar gargalos ambientais de processos e produtos em seus estágios de desenvolvimento, bem como oportunidades para melhorar ainda mais sua eficiência (ELLENBECKER e TSAI, 2011).

Além disso, com base nas pesquisas levantadas, não foram encontrados trabalhos referentes à ACV da produção de biodiesel de microalgas em escala piloto, e de acordo com Itoiz et al. (2012) os estudos recentes encontrados na literatura estão relacionados com sistemas baseados em modelos hipotéticos ou extrapolações de estudos em escala de laboratório que avaliam a ACV do biodiesel produzido a partir de microalgas (JORQUERA et al., 2010; STEPHENSON et al., 2010; CAMPBELL et al., 2011; COLLET et al., 2011; YANG et al., 2011). Dessa maneira, em vista das pesquisas em andamento com uma planta autossustentável em energia a partir da biomassa de microalgas cultivadas em fotobiorreatores compactos industriais (VARGAS, 2012), decidiu-se por avaliar a sustentabilidade através da metodologia de ACV todo o processo de produção em uma escala piloto em funcionamento, como a que se encontra no Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento em Energia Autossustentável (NPDEAS) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), mostrado abaixo na FIGURA 1.1. A concepção desse fotobiorreator compacto industrial é inovadora e foi

recentemente requerida a patente internacional do mesmo pelo NPDEAS (VARGAS et al., 2012). Maiores informações e descrição da produção do NPDEAS podem ser encontradas no Anexo.

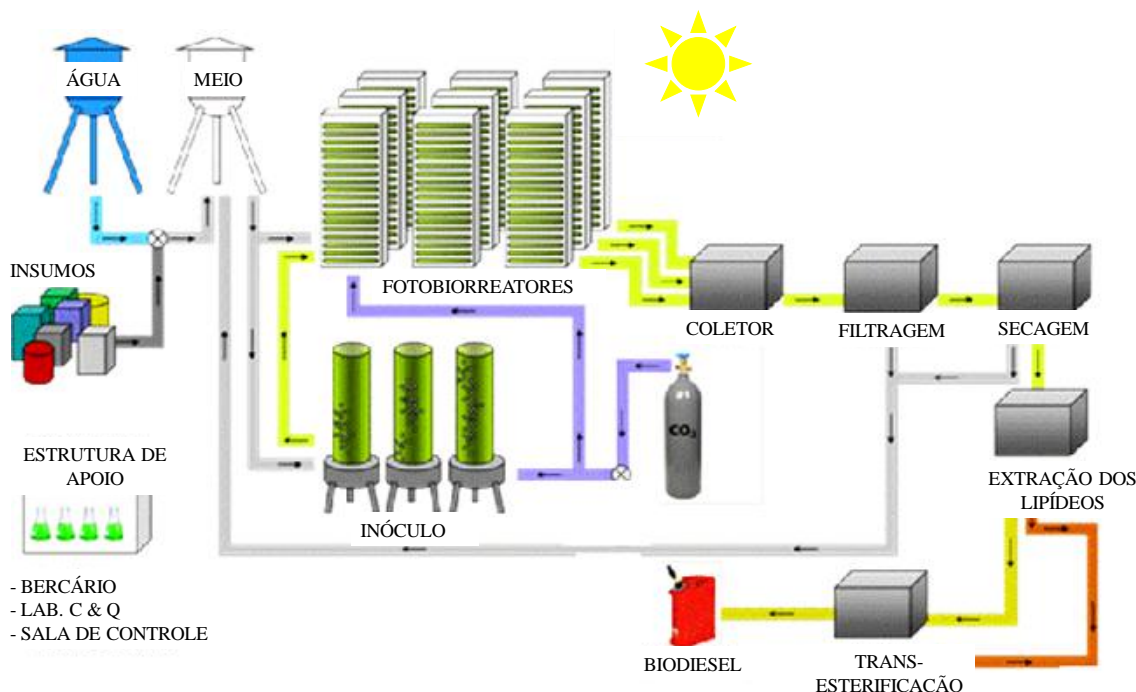


FIGURA 1.1. Diagrama esquemático do processo de obtenção de biodiesel a partir da biomassa de microalgas em escala piloto no NPDEAS. Fonte: Modificado de Satyanarayana et al. (2011).

Dentro deste contexto, este trabalho tem como motivação apresentar um estudo de ACV da produção de biodiesel a partir de microalgas em escala piloto, e busca comparar o impacto ambiental das diferentes rotas tecnológicas consideradas para a etapa de produção do biodiesel a partir de microalgas comparado com biodiesel de soja, palma e canola.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Neste item será realizado um breve resumo sobre os principais tópicos abordados em cada capítulo, e a forma que a tese está organizada.

- Primeiro capítulo: contextualiza o tema, descrevendo o sistema em estudo, também apresenta às motivações para realização deste trabalho, além de apresentar a forma com que o trabalho está organizado.
- Segundo capítulo: apresenta uma revisão bibliográfica dos assuntos relacionados a esta tese, e são apresentados os conceitos da ACV e estado da arte frente à produção de biodiesel de microalgas. E com base nas lacunas encontradas, listam-se alguns desafios

para o avanço da tecnologia na opinião da autora.

- Terceiro capítulo: define-se o objetivo geral, i.e., avaliar a sustentabilidade do modelo de produção de biodiesel de microalgas cultivadas em fotobiorreatores compactos industriais utilizando a metodologia de ACV, a seguir, os objetivos específicos para atingi-lo.
- Quarto capítulo: descreve a metodologia de ACV, as considerações feitas durante a execução do trabalho e o detalhamento das etapas realizadas para a obtenção dos resultados e, finalmente, a metodologia de análise de incertezas para o tratamento dos dados experimentais usados no trabalho.
- Quinto capítulo: apresenta os resultados numéricos obtidos, discutindo-os e apresentando perspectivas para o avanço científico no tratamento do problema.
- Sexto capítulo: expoe as conclusões da pesquisa desta tese. Com base no que foi desenvolvido e nos resultados encontrados, listam-se algumas sugestões para a continuação do avanço científico para a possível implantação da produção em larga escala de biodiesel de microalgas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será realizada uma revisão bibliográfica com o objetivo de esclarecer ao leitor conceitos básicos sobre biodiesel de microalgas e a metodologia de ACV. Para entender melhor todo o processo de produção de biodiesel de microalgas, serão abordadas nessa revisão assuntos como matérias primas para a produção do biodiesel, microalgas, além de apresentar o gênero *Scenedesmus* (microalga encontrada na região que compreende o estudo), os sistemas de cultivo, metodologias para recuperação da biomassa, processos de extração do óleo e conversão em biodiesel. Além disso, essa seção irá apresentar o estado da arte sobre os estudos da produção de biodiesel de microalgas considerando a metodologia de ACV e apontar os principais desafios existentes na área de estudo e dentre eles, os que serão tomados para o desenvolvimento desta tese de doutorado.

2.1 BIODIESEL

A demanda por energia vem aumentando em uma taxa substancial, assim como a economia dos países em desenvolvimento e a população. Atualmente, essa alta demanda é suprida principalmente de recursos de combustíveis fósseis. A consciência da tecnologia de produção limpa é cada vez maior a nível mundial. A necessidade de uma alternativa aos combustíveis fósseis alavancou extensas pesquisas nos últimos anos. Os combustíveis fósseis são fontes não renováveis de energia que geram poluentes e estão ligados ao aquecimento global e mudanças climáticas.

Uma alternativa aos combustíveis fósseis é o biocombustível, e Yuan et al. (2008) definiram os biocombustíveis como combustíveis renováveis de fontes biológicas que podem ser utilizados para a obtenção de calor, eletricidade ou outros tipos de energia, podendo desempenhar um papel essencial na substituição dos combustíveis fósseis utilizados no setor de transporte. Podem ser substitutos diretos podendo ser integrados facilmente nos sistemas logísticos de armazenamento e distribuição utilizados atualmente (ESCOBAR et al., 2009).

Os biocombustíveis podem ser divididos em três grupos, os de primeira geração que são produzidos a partir de produtos agrícolas (óleos comestíveis) (PATIL e DENG, 2009), como beterraba, colza etc, no entanto sua competição com o consumo de alimentos tem sido uma preocupação global. Os biocombustíveis de segunda geração, que são produzidos utilizando a parte não comestível dos vegetais (palha, restos de madeira, resíduos vegetais).

Contrariamente aos biocombustíveis de primeira geração, estes não concorrem com a alimentação humana. E também os biocombustíveis de terceira geração, que se caracterizam pela alta velocidade de produção, alto teor de óleo e carboidratos, capacidade de fixar nitrogênio da atmosfera e com elevada eficiência fotossintética, como o caso do biodiesel de microalgas. Dentre esses biocombustíveis pode ser destacado o biodiesel.

Atualmente as principais tecnologias para obtenção de biodiesel são a transesterificação e a esterificação de óleos e gorduras (JANAUN e ELLIS, 2004). Na reação de transesterificação, o óleo ou gordura, que são compostos basicamente de tri-ésteres de glicerina com ácidos graxos, é misturado a metanol ou etanol e, na presença de um catalisador, dá origem a uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos e glicerina. A esterificação é considerada outra proposta para transformar matérias-primas com altos teores de ácidos graxos em biodiesel também na presença de metanol ou etanol (KEIN, 1945). Na FIGURA 2.1 podem ser observadas as reações de transesterificação e esterificação para obtenção do biodiesel.

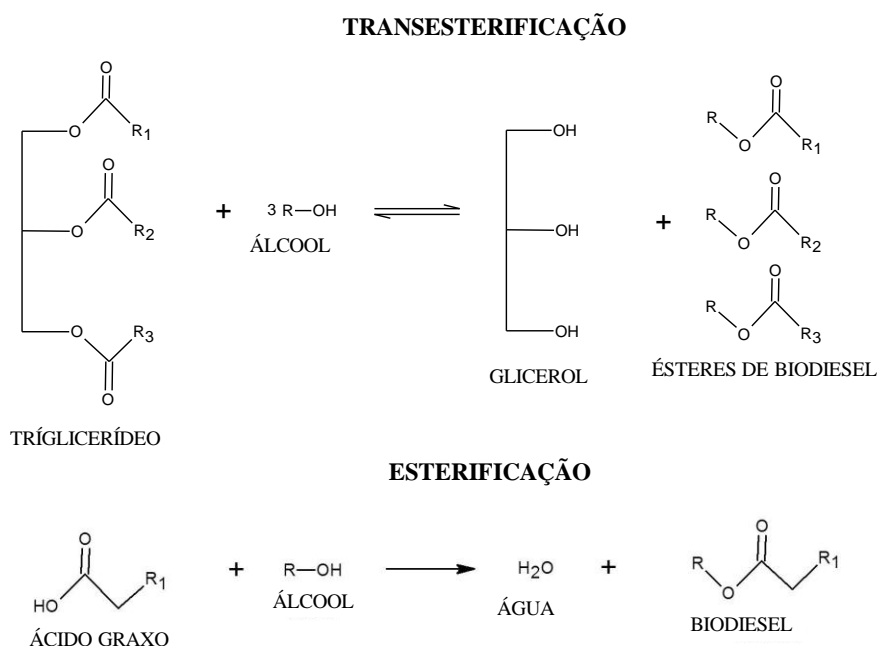


FIGURA 2.1. Reações de transesterificação e esterificação.

Portanto, o biodiesel tem sido identificado como uma das opções complementar aos combustíveis fósseis. A sua produção a partir de fontes biológicas renováveis, como óleos vegetais e gorduras têm sido citados amplamente (ARANSIOLA et al., 2012). Suas vantagens em relação aos combustíveis derivado do petróleo não podem ser subestimadas, pois é renovável, não tóxico e biodegradável; não contém enxofre; é um bom lubrificante, seu uso

não resulta de uma alteração profunda nas tecnologias atuais dos motores e apresentam um potencial importante para aumentar a sustentabilidade do setor energético e reduzir as suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) (CARERE et al., 2008). Além disso, seu uso gera inúmeros benefícios sociais, como revitalização da área rural, a criação de novos postos de trabalho e redução do aquecimento global (KISS et al., 2008).

A investigação de biocombustíveis de terceira geração, tal como o biodiesel a partir de microalgas, vem sendo considerado de extrema importância, dado que estes aparentam ter o potencial para resolver muitos dos problemas relacionados com os biocombustíveis de primeira e segunda geração (RAMALHO, 2013).

2.2 MATÉRIAS-PRIMAS PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL

O biodiesel pode ser derivado a partir de culturas de sementes oleaginosas comestíveis, tais como girassol, palma, semente de canola, de soja, de coco, etc. No Brasil e no mundo, as alternativas renováveis estão sendo cada vez mais estudadas, e o biodiesel, entre outros biocombustíveis vem sendo anunciados como alternativas para a redução de GEE (BRASIL, 2006). Apesar da maior parte do biodiesel produzido mundialmente ser proveniente do óleo de soja, pode-se obter o biodiesel de qualquer óleo vegetal ou a partir de gordura animal e também gordura residual (KNOTHE et al., 2006).

Além da soja, outras oleaginosas foram estudadas como possíveis fontes de ácidos graxos para a produção de biodiesel, dentre elas destacam-se o girassol, a mamona, o milho, a canola, o babaçu, o buriti, o dendê, o amendoim, entre outras (PARENTE, 2003).

A partir de uma análise das informações disponíveis no Boletim da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) sobre o biodiesel e sua distribuição percentual de utilização entre as matérias-primas no Brasil, nota-se que nos últimos anos (2008 - 2014) essa distribuição vem se modificando, no entanto, evidencia-se ainda a alta dependência da soja para produção de biodiesel no Brasil (FIGURA 2.2). Além disso, nota-se que de 2008 para 2014 houve uma diversificação das fontes utilizadas para a obtenção do biodiesel.

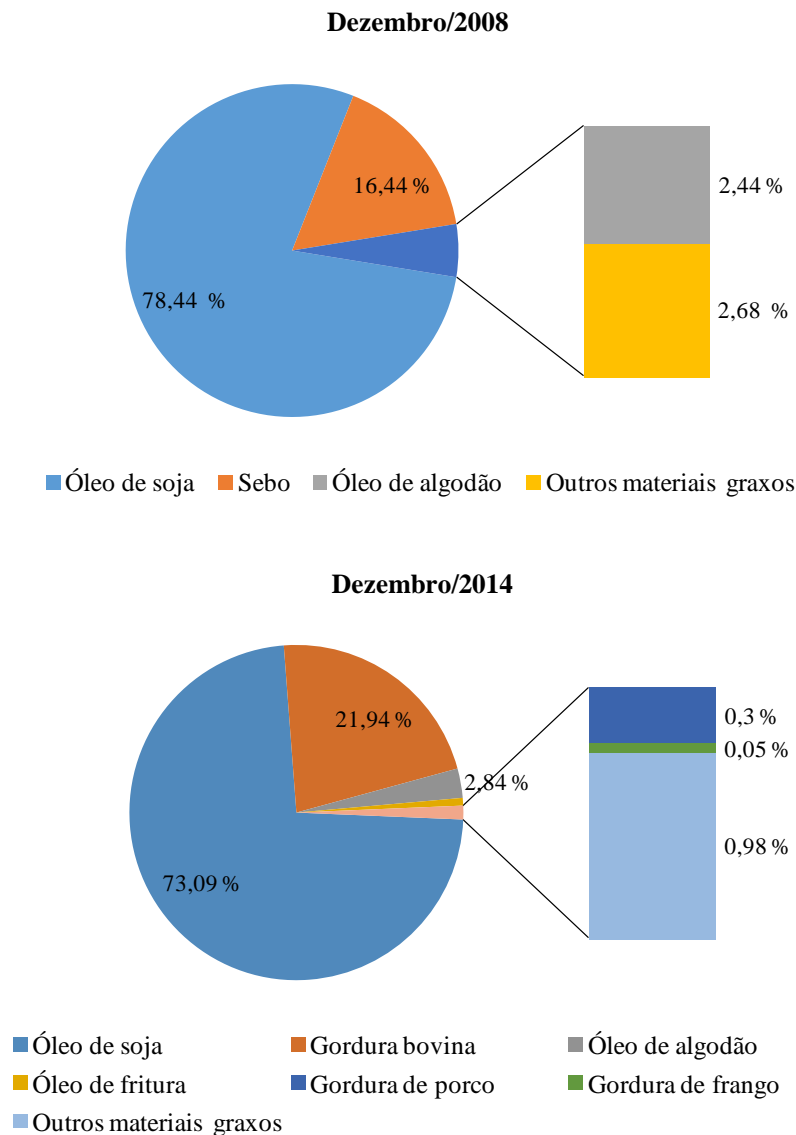


FIGURA 2.2. Distribuição percentual das matérias-primas utilizadas no Brasil como fonte oleagionosa para produção de biodiesel. Fonte: ANP, Dezembro/2008 e Dezembro/2014.

Portanto, a escolha da matéria-prima é de grande importância no processo de produção do biodiesel uma vez que se leva em conta a disponibilidade, o custo, às propriedades de armazenamento e o seu desempenho como combustível (RAMOS et al., 2003). E a viabilidade de utilização de cada tipo de oleaginosa vai depender de sua competitividade técnica, econômica, socioambiental e principalmente viabilidade agrônômica, que segundo Duarte (2009) esta envolve o teor de óleo dos vegetais, a produtividade por unidade de área, o ciclo da planta e a sua adaptação territorial, atendendo a diferentes condições de clima e solo.

As fontes de biocombustíveis derivados de culturas terrestres tais como soja, algodão e girassol, têm pressionado cada dia mais o mercado alimentício, contribuindo também para a escassez da água potável e uma maior destruição das florestas, nesse sentido as microalgas

vêm se destacando com um grande potencial de substituição a essas fontes no que tange a produção de biodiesel, e várias vantagens em relação aos vegetais superiores, como por exemplo, maior sequestro de CO₂ e maior rendimento de óleo por área cultivada (CARVALHO JR., 2009).

Embora a comercialização em larga escala de biodiesel a partir do óleo de microalgas não foi alcançada até o momento, os esforços atuais de pesquisas têm mostrado que o crescimento das microalgas é extremamente rápido e são ricas em óleo (MOAZAMI et al., 2012).

2.2.1 Microalgas como matéria-prima para produção de biodiesel

As microalgas são organismos pertencentes ao reino vegetal que compreendem um grupo muito diverso de organismos fotossintetizantes, são microscópicos, unicelulares, presentes tanto nos meios aquáticos (doce ou salino), como no solo (OLIVEIRA, 2013). Fisiologicamente podem ser procarióticos ou eucarióticos, variam em tamanho, morfologia e outras características (MCHUGH, 2003), sendo compostas basicamente de proteínas, carboidratos, vitaminas e lipídios (SPOLAORE et al., 2006).

Diversas são as aplicações biotecnológicas e industriais de alto valor agregado das microalgas, como por exemplo, na alimentação, indústria farmacêutica e cosmética, e também aplicações ambientais, como por exemplo, o tratamento de águas residuais, fixação de CO₂ e a produção de biocombustíveis (HAREL e CLAYTON, 2004). Além disso, segundo Jorquera et al. (2010), a biomassa microalgal constitui uma das fontes de energia mais promissoras, uma vez que é renovável e neutra em termos de emissões de CO₂. A TABELA 2.1, exemplifica alguns produtos de alto valor agregado e suas possíveis aplicações.

TABELA 2.1 - Produtos de alto valor agregado derivado das microalgas e suas aplicações.

Produtos	Aplicações
Alimentos	Suplemento protéico/ fortificação de dietas de adultos e crianças desnutridas
Alimentação animal	Suplemento de proteínas e vitaminas para peixes, aves e frutos do mar.
Terapia	Produção de pigmentos para tratamento de câncer. Regulação da síntese de colesterol. Produção de antibióticos.
Pigmentos	Produção de pigmentos para indústria alimentícia e reagentes analíticos.
Química Fina	Polissacarídeos para gomas. Glicerol para alimentos, cosmético
Combustíveis	Extração de lipídios para produção de biocombustíveis: biodiesel, hidrogênio, Biogás.
Hormônios	Auxinas, giberilinas.
Outros	Condicionador de solos. Tratamento de efluentes: bovino, suíno e sanitário.

Fonte: Modificado de Becker (1994).

A estrutura unicelular das microalgas permite-lhes facilmente converter energia solar em energia química (HARUN et al. 2010). E devido a isso, as microalgas são consideradas os microrganismos que apresentam a maior eficiência de conversão de luz solar e CO₂ em biomassa, além disso, apresentam um rápido crescimento e o seu teor de óleo pode variar entre 4% e mais de 50% do seu peso seco (LARDON et al., 2009).

As microalgas apresentam muitas vantagens sobre as fontes convencionais, incluindo a soja, óleo de girassol e óleo de milho, e apresentam um potencial de produção de óleo até 100 vezes maior do que o rendimento de biodiesel a partir da soja, e podem ser cultivadas em água salobra e em terrenos não cultiváveis apresentando-se como uma opção atraente como uma fonte de matéria-prima (LEE, 2011). Observa-se na TABELA 2.2, que o teor lipídico das microalgas e sua produtividade estão muito superiores a algumas oleaginosas tradicionalmente utilizadas para a obtenção de biodiesel, o autor não deixa claro qual o sistema de cultivo é considerado para as microalgas.

TABELA 2.2 - Produtividade em biodiesel de matérias-primas tradicionais em comparação ao potencial de produção das microalgas.

Matéria-prima	Teor de óleo (%)	Produtividade em óleo (L.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	Área necessária * (m ² .ano ⁻¹ .kg ⁻¹ biodiesel)	Produtividade em biodiesel (kg.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)
Milho	44	172	66	152
Soja	18	636	18	562
Pinhão-Manso	28	741	15	656
Canola	41	1.190	12	862
Girassol	40	1.070	11	946
Mamona	48	1.307	9	1.156
Palma	36	5.366	2	4.747
Microalgas	10	19.566	0,6	17.309
	30	58.700	0,2	51.927
	50	96.800	0,1	86.515
	70	136.900	0,1	121.104

Nota: * área em m² necessária para produção de 1 kg de biodiesel por ano.

Fonte: Modificado de Mata et al. (2010).

Além dessa alta produtividade de óleo comparada com outras fontes oleaginosas, no processo de extração do óleo das microalgas para a produção de biodiesel, é gerada a biomassa residual, que pode ser utilizada na produção de bioetanol, metano ou biofertilizantes devido à sua alta relação nitrogênio/fósforo ou, ainda, pode ser simplesmente queimada para geração de energia em sistemas de cogeração (SINGH e GU, 2010).

Mas, apesar de todas as vantagens associadas à utilização de microalgas como matéria-prima para a produção de biocombustível, ainda não existe um número considerável de instalações de produção em escala industrial (O'CONNELL et al., 2012).

Existem alguns problemas controversos associados ao uso de microalgas na produção de biocombustíveis. Por exemplo, não é ainda claro que o biodiesel microalgal consiga atingir um balanço energético líquido positivo, por existirem vários processos na cadeia de produção de biodiesel microalgal que são consumidores intensivos de energia, em especial os processos de separação do meio líquido e secagem da biomassa (STEPHENSON et al., 2010).

Segundo Ramalho (2013) a produção de biocombustíveis a partir de microalgas poderá apenas ser considerada uma fonte de combustível viável quando a intensidade energética utilizada do processo de produção de biodiesel microalgal for reduzida. Pois a produção de biocombustíveis avançados a partir de microalgas é altamente dependente de entradas energéticas diretas e indiretas, sendo considerada atualmente questionada a sua viabilidade ambiental (SHIRVANA et al., 2011).

Diversos gêneros de microalgas têm sido citados na literatura como potenciais para a obtenção de biodiesel, como é o caso da *Chlorella*, *Scenedesmus* e *Desmodesmus* (KAUR,

2012), isso devido os óleos extraídos de microalgas apresentam composição em ácidos graxos semelhante às dos óleos vegetais (TEIXEIRA e MORALES, 2006; KAUR, 2012).

No próximo item serão apresentados maiores detalhes sobre o gênero *Scenedesmus*, gênero este que apresenta a vantagem da pré-adaptação às condições de cultivo em ambiente externo, baixo risco de geração de impacto ambiental em caso de vazamento, uma vez que se trata de uma espécie natural da região de Curitiba, além disso, a espécie tem sido utilizada em diversos outros trabalhos no NPDEAS (TAHER, 2013; OLIVEIRA, 2013; SCHROEDER, 2013; MIYAWAKI, 2014).

2.2.1.1 Gênero *Scenedesmus*

Scenedesmus é o gênero de algas verdes mais comuns. A colônia sempre plana é formada por 2 ou 4 células, mas podem ter 8, 16 ou 32 e, raramente, são unicelulares. As células podem ser elipsóides, ovóides, fusiformes ou lunadas e podem ser todas iguais ou as externas serem de uma forma e as internas de outra, conforme mostrado na FIGURA 2.3 (BICUDO e MENEZES, 2005). Estas algas são comumente encontradas no plâncton de água doce de rios, lagos e lagoas.

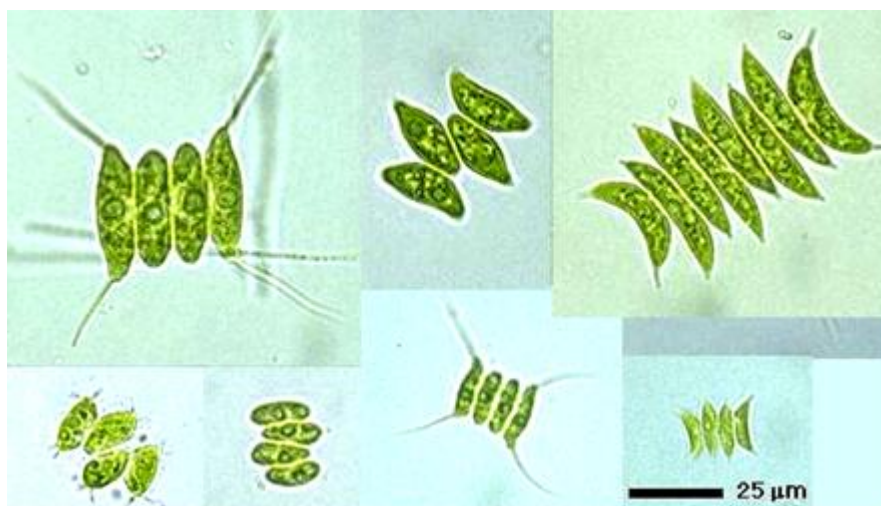


FIGURA 2.3. Microalgas do gênero *Scenedesmus*. Fonte: Site Scenedesmus (2013).

O teor de lipídios das microalgas do gênero *Scenedesmus* pode variar de 11 a 73% (TABELA 2.3), em cultivos padrões, entretanto, pela experiência do grupo que atua no NPDEAS, valores acima de 30% de teor de lipídios são difíceis de serem alcançados em larga escala.

TABELA 2.3 - Teor lipídico encontrado em diferentes espécies da microalga do gênero *Scenedesmus*.

Microalga	Lipídios (%)	Fonte
<i>Scenedesmus obliquus</i>	11 – 55	MATA et al., 2009
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	1,9 – 18,4	
<i>Scenedesmus</i> sp.	19,6 – 21,1	
<i>Scenedesmus</i> sp. DM ^a	21,1	RODOLFI et al., 2009
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	16 – 40	BECKER, 1994
<i>Scenedesmus almeriensis</i>	12	SÁNCHEZ et al., 2008
<i>Scenedesmus rubescens</i> ^b	73	MATSUNAGA, 2009
<i>Scenedesmus</i> sp. ^{a*}	12	SCHROEDER, 2013
<i>Scenedesmus</i> sp. ^{a*}	25	TAHER, 2013

Nota: ^a microalga de água doce; ^b microalga marinha. * Valores referentes a estudos com a microalga que o grupo de pesquisa utiliza no qual a autora faz parte.

As microalgas do gênero *Scenedesmus* têm sido também utilizadas como agentes biorremediadores na remoção de nutrientes da água, melhorando sua qualidade em curto prazo (MARTINEZ et al., 2000). Além disso, em condições adequadas, as microalgas utilizam energia luminosa, carbono e nutrientes para gerar biomassa que pode ser posteriormente utilizada como matéria-prima na produção de biocombustíveis (MATA et al., 2010). A seguir serão apresentados detalhes dos meios nutricionais que as microalgas necessitam para seu crescimento.

2.3 MEIOS NUTRICIONAIS PARA AS MICROALGAS

2.3.1 Meio sintético

Segundo Handler et al. (2012), a maioria das necessidades de micronutrientes e macronutrientes como nitrogênio (N), potássio (P) e fósforo (K) das microalgas têm de ser satisfeitas por fertilizantes químicos. Nos estudos de Stephenson et al. (2010) e Batan et al. (2010), os fertilizantes químicos considerados foram o nitrato de amônia e o superfosfato triplo, que constituem as fontes de N e P, respectivamente.

No entanto, existem outros nutrientes químicos que podem satisfazer as necessidades das microalgas em N e P, segundo Ehimen (2010), como a amônia (NH₃) e a ureia (CO[NH₂]₂). Segundo Shirvani et al. (2011) para maximizar seu nível de produtividade, estes nutrientes químicos devem ser fornecidos de acordo com os requisitos estequiométricos das culturas de microalgas.

Clarens et al. (2010) investigaram os impactos do ciclo de vida do cultivo de microalgas em condições de fornecimento estequiométrico de nutrientes e concluíram que os

impactos ambientais eram principalmente derivados da necessidade de fornecimento de CO₂ e de fertilizantes químicos. Segundo estes autores, a utilização de CO₂ proveniente de gases de combustão como fonte de carbono e de água residual como fonte de nutrientes poderia resultar numa redução significativa das emissões de GEE e da necessidade de fertilizantes químicos.

2.3.2 Meio alternativo

Uma alternativa à utilização de fertilizantes para a produção de microalgas é o uso de resíduos da agroindústria. A aplicação desses elementos como meio de cultivo para as microalgas pode reduzir a necessidade de nutrientes sintéticos e consequentemente resultar em uma redução dos impactos ambientais, no que se refere à diminuição da necessidade de tratamento e disposição final desses efluentes.

O trabalho de Lardon et al. (2009) confirma que um dos entraves referente ao cultivo de microalgas consiste na fonte de nutrientes químicos, sendo responsável por uma parcela significativa dos impactos ambientais e do consumo de energia. O estudo ainda sugere que, se os nutrientes químicos fossem substituídos por efluentes de outros processos, haveria uma redução nos impactos ambientais e na demanda de energia no cultivo de microalgas. Neste sentido, diversos tipos de efluentes têm sido estudados como potenciais meios de cultivo para esses microrganismos, tais como efluentes industriais e domésticos (MCGINN et al., 2011), efluentes da carcinicultura (GALINDRO, 2012), bovinocultura (OLIVEIRA, 2013) suinocultura (TAHER, 2013) e esgoto sanitário (SILVA, 2014).

Em um trabalho semelhante, Clarens et al. (2010) demonstram que a redução do custo total de produção de biomassa de microalgas em um cenário em que parte dos nutrientes utilizados no processo foram substituídos por efluentes parcialmente tratados resultou em uma redução nos impactos ambientais desse processo. Além disso, Oliveira (2013) sugere que, além da redução dos impactos ambientais, também haveria uma redução dos custos da produção de biomassa de microalgas, uma vez que o alto custo da composição do meio de cultivo tradicional - Chu contribui para a inviabilização da produção de biomassa de microalgas em larga escala, pois segundo Grima et al. (2003) o custo do meio tradicional corresponde à aproximadamente 35% do valor total do custo da produção de biomassa microalgal.

Segundo McGinn et al. (2011), os estudos mais recentes de produção de microalgas têm avaliado a possibilidade de integração do cultivo de microalgas com outras atividades,

especialmente industriais, a fim de utilizar os efluentes gerados por esses processos produtivos como matéria-prima para a produção de biomassa microalgal. Esse processo teve por objetivo principal mitigar os impactos ambientais gerados pelas indústrias, no que se refere à geração de efluentes e reduzir o consumo de fertilizantes para a cultivo das microalgas. O trabalho afirma que as microalgas apresentam grande potencial para remoção de nitrogênio, fósforo e metais de efluentes industriais e domésticos.

As águas residuais podem funcionar como fonte de nutrientes, pois estas permitem reduzir os requisitos de nutrientes necessários ao crescimento da biomassa microalgal e ajudar no tratamento das águas residuais urbanas e industriais (STEPHENSON et al., 2010). No estudo de Sander e Murthy (2010) é assumido que as necessidades de nutrientes e de água no cultivo de biomassa microalgal podem ser totalmente satisfeitas pelo uso de efluentes provenientes do tratamento secundário de águas residuais.

2.4 SISTEMAS DE CULTIVO DAS MICROALGAS

A tecnologia utilizada para o cultivo das microalgas envolve principalmente dois tipos de configuração: sistemas abertos e fechados. A utilização do óleo de microalgas para a produção de biodiesel demanda um aumento na escala de cultivo, seja em sistemas abertos ou fechados, uma vez que quase a totalidade dos trabalhos publicados foram desenvolvidos em escala laboratorial.

As técnicas de cultivo de microalgas mais utilizadas atualmente são as lagoas e/ou tanques aerados abertos (FIGURA 2.4) e os fotobiorreatores fechados (CHEN et al., 2011), sendo que o uso de uma ou outra técnica de cultivo é influenciado pelas características do local de cultivo, pela espécie utilizada e quantidade de luz necessária. Além disso, as microalgas também podem ser cultivadas em escala laboratorial. Nos subitens a seguir será detalhado cada sistema de cultivo utilizado no NPDEAS.

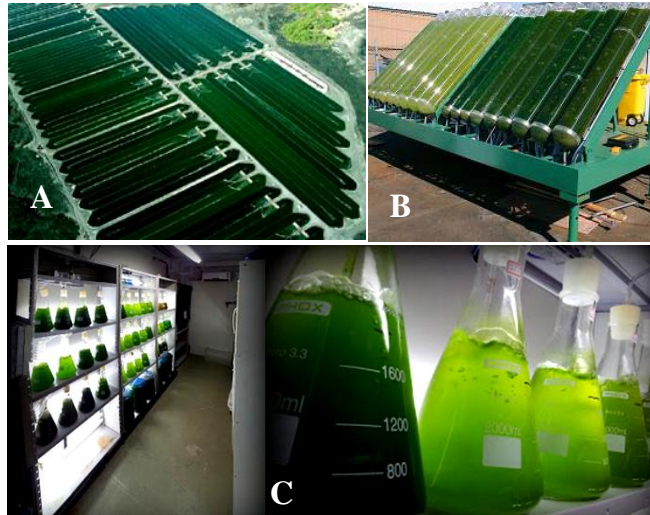


FIGURA 2.4. A: Cultivo de microalgas em tanques aerados em Kona, Havaí, EUA. B: Cultivo de microalgas em fotobiorreator tubular inclinado. C: Cultivo de microalgas em escala laboratorial. Fonte: A: Muñoz e Guieysse (2006); B: <http://www.algatech.com/astax.htm>; C: NPDEAS, (2014).

2.4.1 Sistemas abertos

Para produção de microalgas em larga escala, o primeiro método foi o de lagoa aberta em forma de canal usado desde a década de 50. A FIGURA 2.5 ilustra a lagoa em forma de um circuito fechado, a qual é mantida em movimento por uma roda de pás, segundo Terry e Raymond (1985).

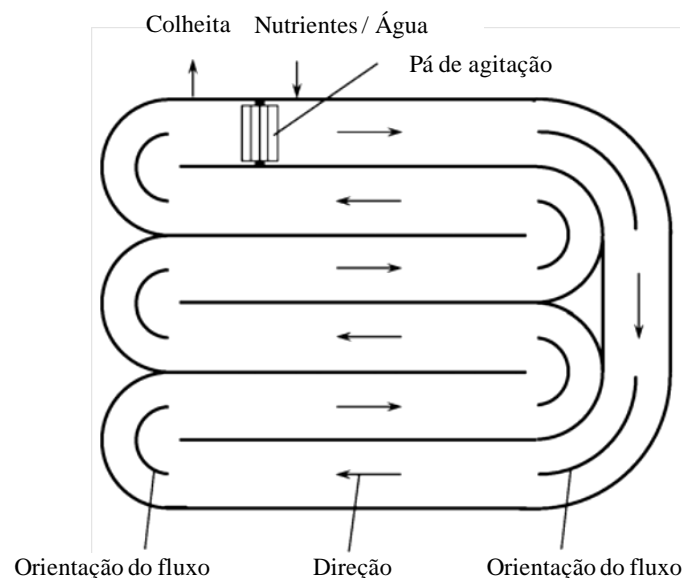


FIGURA 2.5. Esquema da primeira lagoa aberta para cultivo de microalgas do tipo *raceway*. Fonte: Modificado de Terry e Raymond (1985).

As lagoas “*raceway*” são sistemas abertos, pouco profundos (com cerca de 0,3 metros), para permitir a difusão do CO₂ atmosférico e a penetração da luz solar, na qual a

circulação e a mistura da cultura microalgal com os nutrientes é garantida por meio de uma roda de pás metálicas que opera de forma contínua para impedir a ocorrência de sedimentação (CHISTI, 2007), e o arrefecimento ocorre principalmente por evaporação, e a fonte luminosa é através da luz solar (GHASEMI et al., 2011).

Os sistemas abertos chamados de lagoas, normalmente são sistemas mais econômicos seja na etapa de construção quanto em operação comparado com sistemas fechados (FBR), no entanto, são mais susceptíveis às condições climáticas, não permitindo o controle das temperaturas, evaporação e iluminação, além disso, estão mais susceptíveis a contaminações (MATA et al., 2009), dado que a temperatura e a intensidade luminosa variam, para uma determinada latitude, ao longo do dia e do ano (GHASEMI et al., 2011).

Em relação aos materiais para construção dos sistemas abertos, existe uma variação desde os mais baratos, como areia, barro, tijolo ou cimento, até os materiais mais caros, como os plásticos: o cloreto de polivinila (PVC), fibra de vidro ou poliuretano (PU) e para a cobertura quando utilizada, é feita com membranas plásticas de PVC e polietileno ou vidro, até a utilização de lagoas naturais.

Os exemplos de cultivo de microalgas em lagoas naturais mais conhecidos são os de *Dunaliella salina* no México e na Austrália. Os sistemas inclinados são utilizados na Bulgária para produzir espécies dos gêneros *Arthrospira* e *Scenedesmus* e também *Chlorella* na Austrália. Lagoas circulares são utilizadas no Japão, Taiwan e Indonésia para cultivo de *Chlorella* e sistemas do tipo “raceways” são utilizados nos cultivos de *Arthrospira* nos Estados Unidos e *Dunaliella salina* em Israel. Tanques são geralmente utilizados para produção em menor escala para gêneros utilizados na aquicultura, como a *Nannochloropsis oculata*. (BOROWITZKA, 2005; LOURENÇO, 2006; TREDICI, 2004). A FIGURA 2.6 (a, b, c e d) ilustra a produção de microalgas em sistemas abertos.

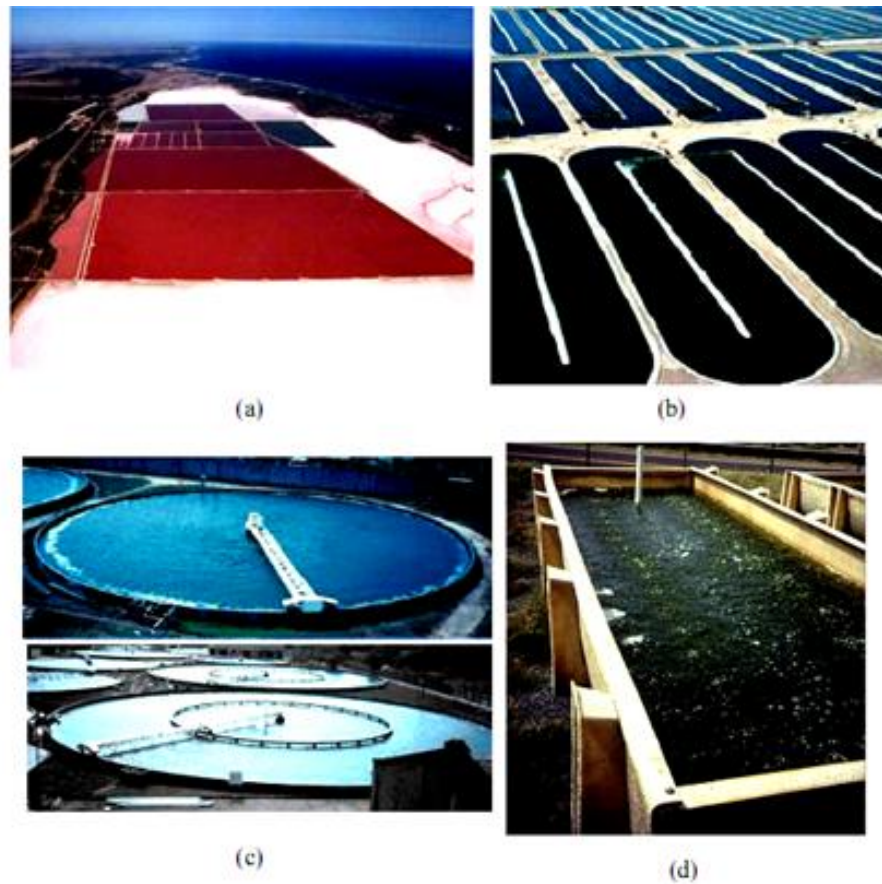


FIGURA 2.6. Exemplos de sistemas abertos para produção de microalgas. (a) produção de *Dunaliella salina* em lagoas abertas na Austrália. (b) sistema raceway, cultivo de *Spirulina* nos EUA. (c) lagoa circular para produção de *Chlorella* em Taiwan. (d) produção de *Nannochloropsis* para aquicultura. Fonte: Borowitzka (2005); Chisti (2007).

2.4.2 Sistemas fechados

Devido a uma evolução dos métodos de produção de microalgas, levou-se à concepção dos sistemas fechados, tipicamente os fotobioreatores (FIGURA 2.7). Estes equipamentos têm sido utilizados com sucesso na produção em larga escala de biomassa microalgal (GRIMA, 1999).



FIGURA 2.7. Sistemas fechados (fotobiorreatores); (a) produção de *Chlorella* em fotobiorreator em casa de vegetação na Alemanha; (b) cultivo em fotobiorreator industrial ao ar livre em Israel; (c) cultivo experimental em fotobiorreator no MIT; (d) Oilgae; (e) Cultivo de *Scenedesmus* sp. no NPDEAS. Fonte: (a) Pulz e Gross (2004); (b) Algatech (2008); (c) Technology (2008); (d) Oilgae (2014) e (e) modificado de NPDEAS (2014).

A produção de microalgas em sistemas fechados permite ultrapassar a maioria dos problemas associados aos sistemas de cultivo em lagoas abertas (CHISTI, 2007). E ao contrário de lagoas abertas os fotobiorreatores permitem essencialmente a cultura de uma única espécie de microalga, ou seja, a cultura fica isolada de qualquer contaminante externo (ROSENBERG et al., 2008).

Os sistemas de cultivo em fotobiorreatores são mais flexíveis e podem ser otimizados de acordo com as características biológicas e fisiológicas das espécies de microalgas utilizadas para o cultivo (MATA et al., 2009), no entanto apresentam maior encargo e energia nos materiais de construção (SCOTT et al., 2010), e segundo Stephenson et al. (2010) os fotobiorreatores apresentam maiores necessidades energéticas e maiores emissões de GEE.

Porém, mesmo que os FBR necessitem de mais investimento na sua construção e operação, existe uma gama de vantagens no uso desses sistemas, como por exemplo: menores perdas de água por evaporação; redução dos problemas de contaminação por outros microrganismos; maior facilidade na colheita de biomassa, que se concentra em menores volumes de cultura; maior controle das trocas gasosas entre o cultivo e o ar atmosférico ou gases de combustão; menor ocupação de espaço; maior rendimento por unidade de área e volume; possibilidade de obter cultivos com alto grau de pureza (UGWU et al., 2008).

Segundo Chisti (2008), mesmo o custo associado à construção dos fotobiorreatores ser em torno de dez vezes maior do que em sistemas abertos, esses são compensados pela maior produtividade de biomassa e concentração celular numa mesma área de cultivo, resultando numa maior produção por área ocupada e favorecendo com isso uma economia de energia na posterior colheita.

Zardo (2011) relata, que essa maior produtividade dos fotobiorreatores em relação aos

sistemas abertos se dá principalmente devido à maior área de exposição à luz, porém se não forem bem projetados podem ocorrer alguns problemas como formação de zonas escuras devido à alta concentração celular e ao fenômeno de fotoinibição.

Pulz (2001) reporta ainda que o grande desafio para o desenvolvimento da biotecnologia microalgal é a criação de sistemas de cultivo que combinem alta produtividade volumétrica e superficial com facilidade de manutenção, de forma a se obter sistemas economicamente eficientes e viáveis.

O subitem a seguir busca elucidar informações sobre o FBR que o NPDEAS opera para cultivo de microalgas em escala piloto

2.4.2.1 Fotobiorreatores compactos do NPDEAS

O NPDEAS busca sua sustentabilidade energética a partir da produção de biodiesel gerado com lipídios provenientes de microalgas. O processo inicia-se com a estrutura de apoio, na qual são cultivadas as cepas para posterior transferência para o FBR tubular compacto, e após o período de cultivo vêm às etapas de colheita (recuperação da biomassa, floculação), extração de lipídios e estes seguem para a produção do biodiesel, pelo processo de esterificação ou transesterificação.

O fotobiorreator é o equipamento no qual as microalgas são cultivadas, e cada unidade do FBR possui volume máximo de 12 m³. Esse reator usa a concepção de arranjo de tubos poliméricos de PVC transparentes circulares. A concepção geométrica é apresentada na FIGURA 2.8, e é baseada na tecnologia de trocadores de calor compactos que é uma área de pesquisa de vários membros da equipe do projeto NPDEAS (VARGAS et al., 2011). A geometria e disposição dos tubos alternados foram selecionadas para melhor permitir a incidência de luz solar nos tubos internos.

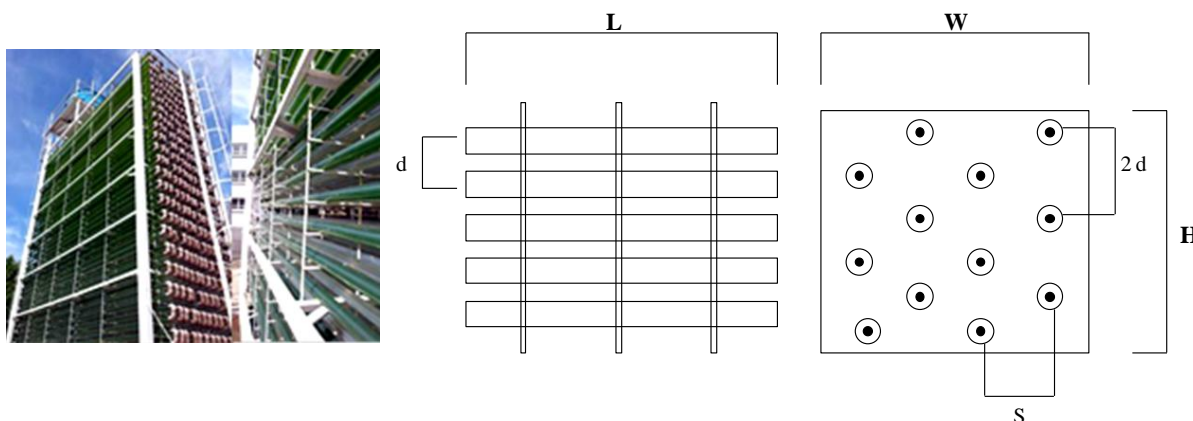


FIGURA 2.8. Arranjo geométrico dos tubos transparentes utilizados nos fotobiorreatores compactos do NPDEAS. Fonte: Modificado de Vargas (2007); NPDEAS (2014).

2.5 RECUPERAÇÃO DA BIOMASSA

Após o cultivo, seja em sistemas abertos ou fechados, a biomassa de microalgas deve ser separada do meio de cultura para que seja aproveitada. As células das microalgas podem conter de 40 a 80% de água intercelular (COONEY et al., 2009, XU et al., 2011). E a remoção dessa água é necessária para que os triacilglicerídeos (TAG) possam ser extraídos com elevada eficiência, que segundo Baliga e Powers (2010) e Xu et al. (2011), a extração é mais eficiente para teores de umidade entre 5 e 15%. Porém, alcançar estes teores de umidade representa um dos principais gargalos do uso de microalgas como matéria-prima para o biodiesel (STEPHENSON et al., 2010).

A recuperação da biomassa é considerada uma etapa de alto custo, e representa cerca de 20 a 30% do custo total de produção (AHMAD et al., 2011), além dos desafios de cunho técnico e operacional para a produção de biomassa de microalgas em larga escala (WANG et al., 2008). Principalmente, este fato ocorre devido às baixas concentrações de biomassa encontradas nos sistemas de produção, que tipicamente variam entre 0,3 - 0,5 g/L e que, em alguns casos, pode chegar a 5 g/L (WANG et al., 2008). E de acordo com Lardon et al. (2009) devido ao reduzido diâmetro deste tipo de biomassa (2 a 20 μm) e à sua dispersão no meio líquido, o que requer a utilização de tecnologias dispendiosas e com elevado consumo de energia.

Diante disso, a colheita da biomassa de microalgas tem sido vista como uma importante área de pesquisa, porque se sabe que este passo responde por uma parcela significativa do processo de produção de biodiesel de microalgas, devido aos altos custos derivado do uso de energia e de produtos químicos utilizados nas etapas.

Atualmente, as principais técnicas aplicadas na colheita das microalgas incluem

centrifugação, floculação, filtração e triagem, sedimentação, flotação, técnicas de eletroforese (UDUMAN et al., 2010; SIRIN et al., 2013), ultra-filtração, às vezes com um a etapa adicional de floculação ou uma combinação de flotação com floculação (WANG et al., 2008) e técnicas integradas (PRAGYA et al., 2013), conforme ilustrado na FIGURA 2.9.

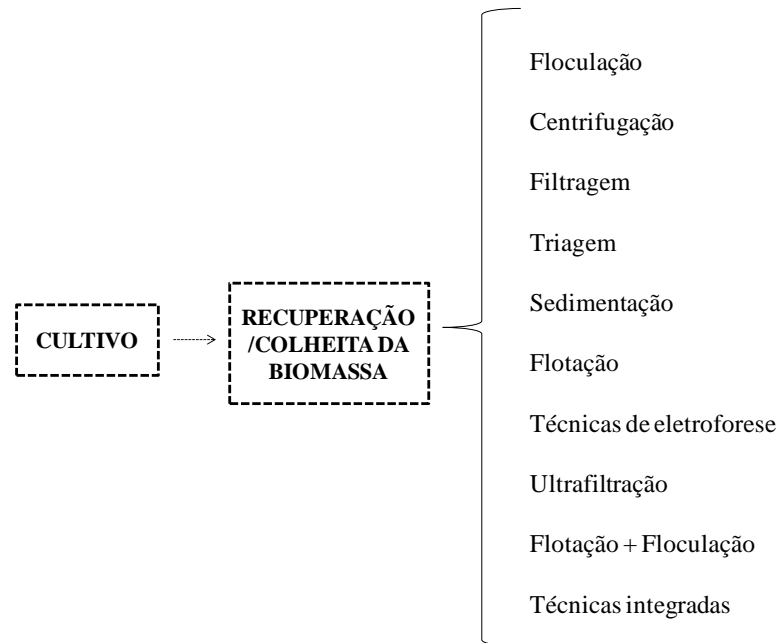


FIGURA 2.9. Opções tecnológicas para recuperação da biomassa de microalgas.

Nos subitens a seguir estão discutidas as técnicas de recuperação da biomassa utilizadas no NPDEAS.

2.5.1 Floculação

A floculação é realizada para aumentar o tamanho efetivo das partículas e aumentar a taxa de sedimentação, assim como da centrifugação e filtração (GRIMA et al., 2003). E de acordo com Boonaert et al. (2002), a floculação é resultado da agregação das células pela adição de polímeros, e a coagulação é a desestabilização que ocorre por ajustes de pH e adição de eletrólitos.

Segundo Lardon et al. (2009) a floculação por ajuste do pH do meio ou a coagulação-floculação por adição de floclulantes sintéticos ou biológicos são duas tecnologias muito utilizadas na colheita da biomassa microalgal, e no ponto de vista energético apresentam um consumo inferior, mas tem associados custos relativamente elevados dos reagentes químicos.

O processo de floculação tem sido considerado um processo viável para recuperar a biomassa por vários autores (HOU et al., 2011; YANFEN et al., 2012; O'CONNEL et al., 2012). Entretanto, depende das características químicas do agente floculante, esses materiais podem danificar as células, levando a perdas de substâncias celulares de interesse (LEE et al., 2009) ou ainda modificar as características do material obtido. Em situações como, por exemplo, extração de metabólitos de alto valor ou alimento, o ideal é empregar floculantes que não sejam tóxicos ou ainda não deixem resíduos. E do ponto de vista econômico, o melhor seria utilizar floculantes baratos e eficientes em baixas concentrações, como veremos a seguir neste trabalho.

Algumas espécies de microalgas sedimentam naturalmente com o aumento do conteúdo lipídico, e outras em resposta a estímulos ambientais, como alterações no pH do meio de cultura e nas concentrações de oxigênio dissolvido (BENEMANN et al., 1996). Do ponto de vista econômico, o custo deste processo é muito menor quando comparado com a floculação química, devido, principalmente ao uso de floculantes. Entretanto, o tempo demandado para o processo ocorrer é longo, o que pode ser uma desvantagem da autofloculação em processos em larga escala.

Vários agentes floculantes químicos têm sido estudados, incluindo floculantes orgânicos e inorgânicos. O sulfato de alumínio tem sido o floculante mais utilizado em estudos de produção de biomassa microalgal para biocombustíveis e, como tal, é o agente químico de floculação mais utilizado nos estudos de ACV destes biocombustíveis (YANFEN et al., 2012), e a sua eficácia é dependente do pH (RIÃÑO et al., 2012).

No entanto, Zimmerman et al. (2011) e Riãno et al. (2012) referem à existência de outros coagulantes promissores, como a quitosana, um polímero natural, biodegradável, não tóxico, policatiónico com múltiplas aplicações em alimentos, agrícola, farmacêutica e química que é produzida a partir de resíduos da pesca de crustáceos, sendo considerada um coagulante renovável.

Além desses, também pode ser usado como agente floculante o Tanfloc, produto é de marca registrada pela empresa TANAC (Brasil). Produto à base de tanino, modificado por um processo físico-químico o que confere ao material um elevado poder floculante. É obtido a partir da *Acacia mearnsii* de Wild. Bark, uma árvore muito comum no Brasil e tem uma alta concentração de taninos. Existem vários estudos que comprovam a atividade coagulante do Tanfloc (SÁNCHEZ- MARTÍN, 2010).

Portanto, para esse processo de floculação no NPDEAS, a equipe tem testado vários agentes floculantes para recuperação de biomassa microalgal, e verificou-se que o Tanfloc

($\pm 96,7\%$), o sulfato de alumínio ($\pm 96,5\%$), cloreto férrico ($\pm 96\%$), quitosana ($\pm 97,3\%$) e hidróxido de sódio ($\pm 93,5\%$) apresentaram elevada eficiência de floculação quando comparados com o hidróxido de cálcio ($\pm 20,8\%$), para os cultivos no NPDEAS com a microalga *Scenedesmus sp.* (SELESU et al., 2014; LEMOS, 2013).

2.5.2 Filtragem

Nesta tecnologia, o cultivo passa por filtros ou membranas que impedem que as microalgas atravessem, onde somente a água passe através deles. Esses filtros ou membranas podem ser de celulose ou de fibra de vidro em escala laboratorial. As membranas de fibra de vidro têm aproximadamente $0,45\ \mu\text{m}$ e de celulose geralmente $5\ \mu\text{m}$. Para escala piloto ou industrial alguns autores sugerem o uso de filtro rotatório ou filtro prensa. Quando utilizado membranas para grandes volumes podem ser membranas de *Oxford*, onde o material percola através dele até obter uma pasta grossa de microalgas.

Segundo Rodrigues et al. (2003), essa membrana pode ser definida como uma barreira seletiva, sólida ou líquida, que separa duas fases e restringe o transporte de uma ou várias espécies químicas de maneira específica. No entanto, a maior limitação em relação ao processo de separação por membrana é devido ao fato que a maioria dos sistemas que envolvem microrganismos ou suspensões está sujeitos às restrições de transferência de massa e diminuição na taxa de permeação causadas pelo “*fouling*” (adsorção e/ou bloqueio de poros), pela formação da camada polarizada de concentração (acúmulo de substâncias próximo à superfície da membrana) (VLADISAVLJEVIC et al., 2003; CARNEIRO et al., 2002), prolongando o tempo de processamento do cultivo através da filtragem.

Outra tecnologia que pode ser utilizada de acordo com Sander e Murthy (2010), é a utilização de filtros prensas após as microalgas atingirem a concentração adequada para colheita. Além disso, alguns autores citam a filtragem operada sob pressão ou a vácuo, sendo um método preferido para a coleta de microrganismos filamentosos relativamente grandes como as microalgas *Spirulina platensis*, além da microfiltração que se mostrou adequada para a recuperação de microalgas (HUNG e LIU, 2006).

Na maioria dos trabalhos considerados nesta revisão bibliográfica, o processo de filtração surge sempre associado a processos acoplados como a floculação e/ou a centrifugação (BORKOWSKI et al., 2012; SORATANA et al., 2012).

No entanto, atualmente instalações de produção de biomassa de microalgas em escala industrial geralmente não utilizam a filtragem através de membranas, devido à preocupação

com custos de substituição das membranas e de bombeamento (ROCHA, 2010). Além disso, essa tecnologia de filtragem por membranas foi testada no NPDEAS, e se mostrou inviável devido ao demasiado tempo necessário para filtrar grandes volumes de cultivo (NPDEAS, 2014).

2.5.3 Centrifugação

Para a centrifugação alguns equipamentos são citados, como, os de parede fixa (hidrociclones) e dispositivos com parede rotativa (centrífugas de sedimentação) (SHELEF et al., 1984). Avanços na engenharia de materiais possibilitaram o uso de centrífugas em altas velocidades e resistentes à corrosão em bioprocessos em larga escala (GRIMA et al., 2007).

Embora alguns tipos de centrífugas sejam bastante confiáveis e eficientes, devem-se levar em consideração que este método apresenta elevado custo operacional devido, principalmente, ao gasto energético necessário para a realização do processo (GRIMA et al., 2003; RAMALHO, 2013).

Do ponto de vista técnico e operacional, a sedimentação centrífuga é um método bastante recomendado para a recuperação de biomassa em sistemas de produção de microalgas por ser rápido e confiável, apresentando características ideais para a produção em larga escala. E segundo Heasman et al. (2000) a recuperação da biomassa por centrifugação é viável para produtos de alto valor, porque este processo pode processar grandes volumes de forma relativamente rápida e a biomassa permanece totalmente contida durante a recuperação.

Alguns trabalhos recentes publicados na literatura, os autores consideraram a recuperação da biomassa de microalgas sendo feita exclusivamente pela centrifugação (ITOIZ et al., 2012; DUFOUR et al., 2011). No caso do trabalho de Dufour et al. (2011), é aplicado um processo de secagem da biomassa microalgal à temperatura ambiente (secagem por radiação solar) após a centrifugação.

No entanto, Sander e Murthy (2010) comentam que a perspectiva destes dois trabalhos é otimista dado que considera apenas a necessidade de um processo de separação da biomassa microalgal, mas não parece ser realista, uma vez que a centrifugação apresenta uma eficiência reduzida na recuperação dos sólidos quando não é antecedida por uma tecnologia de concentração desses sólidos.

2.5.4 Secagem térmica

A recuperação de biomassa descrita nos subitens acima gera um lodo com um conteúdo de sólidos secos da ordem de 5 - 20%. Esse material pode ser desidratado e secado para ser convertido posteriormente em biodiesel. Os principais métodos que vêm sendo utilizados incluem secagem ao sol, secagem em baixa pressão, secagem por pulverização, tambor de secagem, liofilização, secagem em leito fluidizado (BRENNAN e OWENDE, 2010) ou secagem em estufas com temperaturas controladas (NPDEAS, 2014). No entanto, esta etapa de desidratação tem um intensivo uso de energia devido à extensa secagem térmica necessária para eliminar a água intercelular (XU et al., 2011).

Em uma ACV conduzida por Lardon et al. (2009) a respeito do processo de produção de biodiesel de microalgas, verificou-se que a fase de secagem contribuiu 84,9% do total de energia consumida do processo. Este estudo foi baseado em extrapolações de estudos de escala laboratorial, e serviu para identificar os principais obstáculos na produção do biodiesel de microalgas. Apesar disso, existe um erro inerente em extrapolar dados de escala de laboratório tendo em vista que a escala e dimensionamento dos equipamentos não estão projetados para atingir a eficiência energética do processo como, por exemplo, o uso de estufas para secagem de apenas algumas amostras em um regime batelada.

Normalmente equipamentos laboratoriais são usados em momentos pontuais e gastos energéticos destinados ao procedimento de início de funcionamento e desligamento podem muitas vezes ser considerados no processo e isso prejudicar sobremaneira a análise do processo, em especial, a respeito de questões energéticas como no consumo.

Portanto, Xu et al. (2011) explorou a redução do consumo de energia do processo pela utilização de uma série de tecnologias de desidratação e de secagem. Segundo este trabalho, a fase de secagem pode ser melhorada pelo acoplamento de vários métodos. Neste sentido, a floculação é a forma mais eficiente de se concentrar inicialmente as microalgas em solução; no entanto, a concentração de sólidos secos, resultante não excederá 5% e desidratação adicional é necessário para atingir teores mais baixos de umidade (UDUMAN et al., 2010) por meio de outras técnicas como a secagem.

Outros métodos de secagem são eficientes, porém, apresentam alto custo. Um exemplo consiste na secagem por *spray dryer* que é um método eficiente, porém, com alto custo e, portanto, só é recomendado em sistema de produção de produtos de alto valor comercial. Além disso, Grima et al. (2007) relata que este método pode causar uma significativa deterioração da biomassa, principalmente de alguns pigmentos.

Outro exemplo de método eficiente, que também apresenta custo elevado, trata-se da liofilização. Este método consiste no congelamento da biomassa recuperada e posterior sublimação dos cristais de gelo. Porém, segundo alguns autores são necessários cerca de 2.800 kJ para cada kg de gelo removido (GRIMA et al., 2007).

Porém, apesar do surgimento de novos designs de secadores mecânicos com alta eficiência (JIANG et al., 2010), nenhum resultado em escala industrial ou utilização destes secadores em produção de biomassa de microalgas foi divulgado até o momento (XU et al., 2011).

Lam et al. (2012) referem que a secagem solar é atualmente considerada o método ideal para secar a biomassa microalgal úmida, dado que não apresenta emissões de CO₂ e não necessita de entradas energéticas. Parece ser uma tecnologia promissora sob o ponto de vista econômico e ambiental, no entanto, existem certamente limitações geográficas e sazonais, portanto pode ser inviável a aplicação desta tecnologia em países ou em épocas do ano com radiação solar reduzida e com temperaturas médias diárias também reduzidas.

2.6 EXTRAÇÃO DOS ÁCIDOS GRAXOS DAS MICROALGAS

Enquanto volumes relativamente limitados de bioprodutos são atualmente produzidos a partir de microalgas, a produção de biocombustíveis a partir desta matéria-prima se depara com a falta de métodos de extração bem definidos e demonstrados em escala industrial necessários para permitir o avanço desta indústria (US. DOE, 2010).

A extração do óleo a partir da biomassa microalgal é assunto de muita discussão e não é claro qual das tecnologias atualmente existentes é a mais eficiente (RAMALHO, 2013). Segundo Azeredo (2012) a falta de informações relevantes sobre o estado atual da eficiência e aumento de escala das técnicas de extração de lipídios e óleos também é um fator limitante ao desenvolvimento dos biocombustíveis à base de microalgas.

Testes com diversos métodos vêm sendo realizados (LEE et al., 2010), como a extração mecânica, a extração por solventes e a extração por fluido supercrítico (CHISTI, 2007). A extração do óleo também pode ser feita pela saponificação, método este que busca resolver o reconhecido gargalo na produção de biodiesel de microalgas, que é a retirada da água da biomassa de microalgas através da secagem (UDUMAN et al., 2010). Porém, cada um desses processos requer energia e apresentam rendimentos diferentes, no entanto, a fim de obter máximo rendimento, as técnicas podem ser combinadas.

Lam et al. (2012) referem que a utilização de solventes químicos, como o hexano, o

metanol e o clorofórmio, são mais eficientes na extração de lipídios a partir de microalgas comparativamente à prensagem mecânica, principalmente pelo fato de os solventes químicos apresentarem elevada seletividade aos lipídios microalgais, assim, até mesmo os lipídios internos podem ser extraídos por difusão pela parede celular da biomassa microalgal.

No estudo de Lardon et al. (2009) apresentaram duas opções de extração de óleo: (a) extração do óleo da biomassa seca juntamente com o hexano; e (b) extração do óleo da biomassa úmida. Os autores (LARDON et al., 2009) demonstraram que melhorias no processo de extração de óleo teria um impacto direto na sustentabilidade da produção de biodiesel, pois 90% do consumo de energia do processo é dedicado à extração de lipídios quando se utiliza a biomassa seca, e 70% quando considerada a extração da biomassa úmida. E relatam que extração do óleo através da biomassa seca só seria possível, utilizando um método alternativo para a secagem da biomassa (por exemplo, a secagem solar, mas a sua viabilidade prática nunca foi demonstrada).

A revisão bibliográfica mostrou que o método de extração de óleos frequentemente considerado nos últimos anos foi à extração pelo uso de hexano como solvente (BATAN et al., 2010; DUFOUR et al., 2011; HOU et al., 2011; WIBUL et al., 2012; YANFEN et al., 2012).

2.6.1 Extração dos ácidos graxos por saponificação seguida de acidificação

Esta metodologia trata-se da obtenção de ácidos graxos através da saponificação da biomassa úmida de microalgas diretamente sem a necessidade da secagem. Essa metodologia consiste em algumas etapas, sendo elas: i) a saponificação com o uso de hidróxido de potássio (KOH) e etanol, ii) o uso de n-hexano, obtendo uma fase aquosa e outra apolar, iii) a fase aquosa é então acidificada com ácido clorídrico (HCl) obtendo ácidos graxos e fração aquosa, que iv) recebe novamente n-hexano e, finalmente os ácidos graxos são retirados por decantação simples. O n-hexano é reciclado no processo. O esquema desta reação pode ser observado na FIGURA 2.10.

Mecanismo de saponificação dos triacilgliceróis

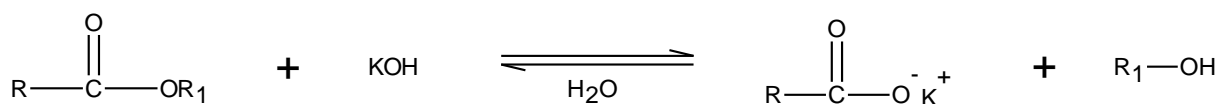


FIGURA 2.10. Mecanismo de saponificação dos triacilglicerídeos.

A saponificação é a reação dos triacilgliceróis com álcalis promovendo o rompimento das ligações ésteres na matriz lipoprotéica. Prefere-se a utilização do hidróxido de potássio (KOH) por produzir sabão mole, o que determina a não solidificação dos extratos obtidos à temperatura ambiente (PERKINS, 1993).

Após a formação do sabão (que é um contaminante do biodiesel), é necessário transformá-lo no respectivo ácido conjugado (FFA) através de uma reação ácido/base, e em seguida é necessário efetuar uma esterificação dos FFA de forma a transformá-los em biodiesel (VERGA REI, 2007). Segundo o mesmo autor a principal vantagem da utilização deste processo reacional é a possibilidade de não só converter triglicerídeos, como também os ácidos graxos livres existentes, permitindo assim a utilização de óleos com elevados taxas de ácidos graxos livres. No entanto, o autor comenta que a desvantagem é que o processo consiste de uma alcalinozação seguida de uma acidificação, o que resulta num elevado teor de sais no produto final. Este processo além de requerer maiores dispêndios em catalisadores, requer também maior número de operações de separação/purificação, resultando também num maior dispêndio em operações de separação/purificação.

2.7 CONVERSÃO DOS ÁCIDOS GRAXOS EM BIODIESEL

O óleo extraído da biomassa microalgal, pode ser convertido a biocombustíveis renováveis, como o metano, biodiesel e biohidrogênio, por processos químicos, termoquímicos ou biológicos, como transesterificação, esterificação, gaseificação, liquefação, pirólise, hidrogenação e fermentação (MENG et al., 2009). As tecnologias e os processos de produção de biodiesel a partir de óleos vegetais, animais e residuais estão bem estabelecidos e os mesmos também podem ser aplicados para a produção de biodiesel a partir dos óleos de microalgas (AZEREDO, 2012).

Processos de esterificação de ácidos graxos assumem grande importância para a produção de biodiesel ao serem consideradas rotas tecnológicas baseadas em matérias-primas de alta acidez (RAMOS et al., 2011).

A FIGURA 2.11 mostra o mecanismo de esterificação de ácidos graxos. Onde R e R₁ representam, respectivamente, as cadeias carbônicas hidrofóbicas do ácido graxo e do álcool (RAMOS et al., 2011). O mecanismo mostra que a protonação do grupo carbonila do ácido que leva à formação um carbocátion, que posteriormente passa por um ataque nucleofílico do álcool R₁-OH, produzindo um intermediário tetraédrico que, por sua vez, elimina água e leva à formação do éster e à regeneração do catalisador H⁺.

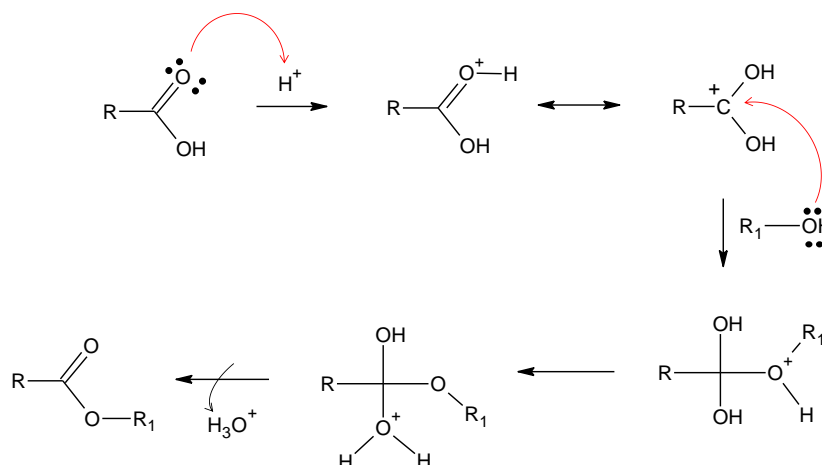


FIGURA 2.11. Mecanismo de esterificação dos ácidos graxos. Fonte: Modificado de Ramos et al. (2011).

Além da esterificação, o uso do biodiesel obtido por processos enzimáticos apresenta uma série de vantagens sobre o processo químico, sendo o custo e a demora da reação ainda as principais desvantagens do processo enzimático. Na TABELA 2.4 pode ser observada uma comparação entre os dois processos de obtenção do biodiesel.

TABELA 2.4 - Vantagens e desvantagens do processo químico e enzimático na produção de biodiesel.

Processos	Vantagens	Desvantagens
Químico	<ul style="list-style-type: none"> - Simplicidade - Alto rendimento - Curto tempo de reação 	<ul style="list-style-type: none"> - Dificuldade de separação do catalisador - Impossibilidade de reutilização do catalisador - Dificuldade de utilização de etanol hidratado - Obtenção de produtos com menor grau de pureza
Enzimático	<ul style="list-style-type: none"> - Facilidade de separação do catalisador - Obtenção de produtos mais puros - Permite o uso de etanol hidratado na reação 	<ul style="list-style-type: none"> - Longo tempo de reação - Custo das enzimas

Fonte: Fernandes (2002).

O processo enzimático de produção de biodiesel ainda enfrenta algumas limitações para um futuro emprego em larga escala, devido ao longo tempo de reação e alto custo destes biocatalisadores (BAJAJ et al., 2010; FERNANDES, 2006).

Atualmente, tem sido muito utilizado o metanol para a síntese de lipídios microalgais, porém, são necessárias pesquisas para minimizar a dependência do metanol durante a etapa, uma vez que o metanol em geral é proveniente de combustíveis fósseis (LAM et al., 2012). Por outro lado, a utilização de etanol substituindo o metanol, possibilita um processo de

produção do biodiesel totalmente gerado a partir de fontes renováveis, além de apresentar vantagens nas emissões dos veículos e no controle do crescimento microbiano nos recipientes de armazenamento (BORKOWSKI et al., 2012).

Para o Brasil, seria economicamente viável a substituição do metanol pelo etanol, uma vez que o país se destaca na produção mundial dessa *commodity*. No entanto, embora o bioetanol apresente diversas vantagens relativamente ao metanol na produção de biodiesel, não tem sido estudado tão extensivamente como o metanol (BORKOWSKI et al., 2012).

2.8 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

A ACV é uma metodologia que avalia desde a extração dos recursos naturais até seu descarte para analisar sistemas industriais, produtos ou processos. Ela avalia a coleta de matérias-primas do meio ambiente para produzir o produto e finaliza no ponto onde todos os materiais são descartados.

A análise também permite a estimativa dos impactos ambientais cumulativos que resultam de todas as fases do ciclo de vida do produto, incluindo frequentemente impactos que não são considerados em análises mais tradicionais (por exemplo, a extração da matéria-prima, o transporte dos materiais).

Especificamente, a ACV é uma técnica para avaliar os aspectos ambientais e impactos potenciais associados com um produto, processo ou serviço. O processo de uma ACV é uma abordagem sistemática e é baseada em quatro fases: definição de metas e escopo, análise do inventário, avaliação de impacto e interpretação, conforme ilustrado na FIGURA 2.12.

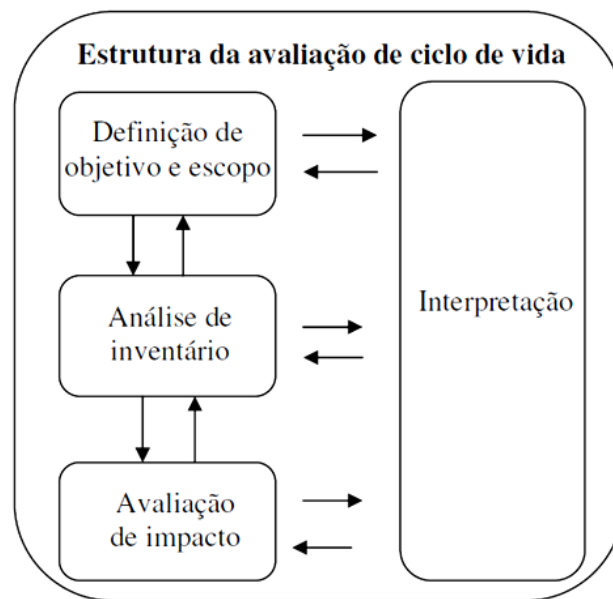


FIGURA 2.12. Fases de uma ACV. Fonte: Modificado de ISO (1997).

• **Definição do Objetivo e Escopo** – tem com intuito definir e descrever o produto, processo ou atividade. Estabelecer o contexto em que a avaliação deve ser feita e identificar os limites e os efeitos ambientais a serem analisados para a avaliação.

• **Análise do Inventário** – etapa que Identifica e quantifica a energia, água e materiais de uso e liberações ambientais (por exemplo, emissões atmosféricas, descarte de resíduos sólidos, descargas de águas residuais).

• **Avaliação de Impacto** - Avalia os efeitos ecológicos de energia, água e potencial humano, e uso de materiais e as liberações ambientais identificados na análise de inventário.

• **Interpretação** - Avalia os resultados da análise de inventário e avaliação do impacto do produto selecionado, processo ou serviço com uma compreensão clara da incerteza e os pressupostos utilizados para gerar os resultados.

2.8.1 Fronteiras do sistema

Na avaliação do ciclo de vida de um produto ou processo, as fronteiras do sistema devem ser claramente definidas, uma vez que os resultados da ACV são sensíveis à definição destas (BATAN et al., 2010).

Para a realização de uma ACV coerente de um processo de produção de biodiesel microalgal são necessários modelos detalhados de cada fase de processamento da matéria-prima, os quais são combinados com um conjunto padrão e consistente de condições de

fronteira do sistema da ACV (BATAN et al., 2010).

E segundo Jolliet et al. (2005) há sempre um limite para cada sistema que inclui todos os processos no sistema para o seu pleno funcionamento (JOLLIET et al., 2005), e em estudos de ACV completos, a fronteira do sistema é elaborada para abranger todas as etapas do ciclo de vida, ou seja, da extração dos recursos naturais até o descarte dos mesmos. Porém, o sistema em estudo neste trabalho não inclui a combustão final de biodiesel no motor.

2.8.2 Unidade funcional (UF)

Atendendo à necessidade de quantificar o desempenho do sistema em estudo, e de modo a poder comparar posteriormente os resultados obtidos, é preciso aplicar uma unidade que possa traduzir a função, eficácia e durabilidade do sistema (VALE e PAIVA, 2003).

No que diz respeito à unidade funcional Goedkoop et al. (2010) definem-na como um indicador do desempenho do sistema de produto, que constitui a referência de comparação entre as entradas e as saídas do sistema. E esta referência assegura que a comparação de resultados seja efetuada em uma base comum, sendo de particular importância quando comparados e avaliados sistemas diferentes (FERREIRA, 2004).

2.8.3 Inventário dos dados do ciclo de vida

A análise de inventário envolve a coleta dos dados necessários para cumprir as metas do estudo. Este quantifica as entradas (massa e energia) e saídas (produtos e emissões para o ar, água e terra) para todas as etapas de processamento incluídas na fronteira do sistema, sendo crucial, pois deve garantir a disponibilidade e qualidade dos dados.

Nessa fase é elaborada uma lista que contém as quantidades de recursos e energia utilizados, e de poluentes emitidos ao ambiente. O resultado pode ser segregado por etapas do ciclo de vida, por meios físicos (ar, água, solo), processos específicos ou por qualquer combinação (EPA, 2006).

Além disso, na fase de inventário tem-se a oportunidade de refinar as fronteiras do sistema, pois o processo de coleta de dados é iterativo. Uma vez que os dados são coletados, reavalia-se o sistema, podendo acontecer novos requisitos de dados ou limitações sejam identificados (REBITZER, 2005).

2.8.4 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

A AICV é a 3ª fase de uma ACV, e seu principal objetivo é traduzir as cargas ambientais quantificadas na fase de levantamento do inventário em impactos relacionados. A fase de avaliação de impacto de uma ACV é definida como um processo quantitativo e/ou qualitativo para identificar, caracterizar e avaliar os potenciais impactos das intervenções ambientais identificadas na análise de inventário.

Para esse estudo, os dados foram compilados e os resultados obtidos, a partir da utilização do software *SimaPro* 7.3. Esse software é composto por diversos métodos, bem como milhares de substâncias, no entanto, é importante identificar e selecionar apenas as substâncias que influenciam significativamente na ACV em estudo.

Cada método do *SimaPro*, é composto por várias categorias de impacto, e é importante mencionar que a seleção das categorias de impacto deve ser consistente com a meta e o alcance do estudo de ACV, e também devem refletir as questões ambientais do sistema em estudo.

Dentro os métodos para realização da ACV existem os métodos *midpoints* (abordagem orientada ao problema) a unidade de referência são os compostos químicos relacionados a cada categoria de impacto ambiental, e os métodos *endpoint* (abordagem orientada para o dano), no qual a unidade de referência são os danos causados a saúde humana, aos ecossistemas e aos recursos naturais.

Os métodos classificados como *endpoint*, Silva (2012) descreve como uma modelagem que caracteriza a gravidade dos aspectos ambientais provenientes do ICV e correlaciona aos danos finais. Para Alvarenga (2012) e Bare et al (2000) os métodos *endpoint* por serem direcionados aos danos finais possuem mais vantagem em relação à tomada de decisão, no entanto, possuem alta subjetividade, ao contrário dos métodos *midpoint*.

Para esse estudo será utilizado dois métodos de avaliação o CML 2000, este considerado *midpoint* (GUINNÉ, 2001) e o *endpoint* Eco-Indicator 99 (GOEDKOOOP, 2000). Estes métodos estão integrados as bases de dados do *Ecoinvent* e implementados aos softwares de ACV (PIZZOL et al, 2011), a seguir será detalhado cada um desses métodos.

2.8.4.1 Método CML 2000

Esse método foi desenvolvido na Holanda pelo Center of Environmental Science of Leiden University, sendo um dos mais utilizados para estudos de ACV de microalgas, o que

facilita a comparação dos resultados. Trata-se de um método *midpoint*, ou seja, que restringe a modelagem quantitativa para os estágios iniciais da cadeia de causa-efeito para diminuir as incertezas. Esse método apresenta diversas categorias de impacto ambiental, convertendo os dados de fluxos de matéria e energia em unidades de medidas específicas, de acordo com a unidade funcional proposta pelo estudo (GUINEÉ, 2002).

Com a aplicação deste método é obtido um elevado número de categorias de impactos ambientais (TABELA 2.5) associados aos diversos tipos de problemas ambientais (GOEDKOOP et al., 2010). Segundo Alvarenga (2010) o método mais utilizado em estudos de ACV que adotam a abordagem *midpoint* é o CML.

TABELA 2.5 - Categorias de impacto do método CML 2000.

Categoria de impacto ambiental	Unidade	Abrangência de aplicação
Potencial de Aquecimento Global (PAG)	kg CO _{2eq.}	Global
Acidificação (AC)	kg SO _{2eq.}	Global
Eutrofização (EU)	kg PO _{4eq.}	Global
Depleção abiótica (DA)	kg Sb _{eq.}	Global
Depleção da camada de ozônio (DCO)	kg CFC _{11eq.}	Global
Toxicidade humana (TH)	kg DCB _{eq.}	Global
Ecotoxicidade de recursos de água doce (EAD)	kg DCB _{eq.}	Global
Ecotoxicidade de recursos de água marinha (EAM)	kg DCB _{eq.}	Global
Ecotoxicidade terrestre (ET)	kg DCB _{eq.}	Global
Oxidação fotoquímica (OF)	kg C ₂ H _{2eq.}	Global

Fonte: Modificado de Goedkoop et al. (2010).

Para essa metodologia ser empregada, os dados do inventário foram coletados e inseridos no software. O modelo compilou os dados nas categorias de impacto, de acordo com as unidades de referência de cada processo elementar e com os fatores de caracterização dos fluxos ambientais.

2.8.4.2 Eco-Indicator 99

O Método Eco-Indicator 99 foi desenvolvido na Holanda por um grupo científico especializado em ACV e em ciências ambientais, com apoio do Ministério Holandês do Meio Ambiente (PIEKARSKI et al, 2013). A sua versão mais antiga (Eco-Indicator 95) foi criticada por especialistas em meio ambiente segundo Mendes (2013), devido ao fato de não contabilizar alguns aspectos ambientais, os quais passaram a ser abordados pela atual versão. A nova versão do método possui uma abordagem *endpoint*, onde os aspectos ambientais provenientes do ICV são diretamente relacionados aos danos finais (SILVA, 2012).

Apresentando uma relação entre o impacto e os danos para a saúde humana ou para o ecossistema.

Segundo Alvarenga (2010) e Mendes (2013), o método mais utilizado no grupo de métodos orientados ao dano é o Eco-Indicator 99, por ser facilitador em simplificar a interpretação e ponderação dos resultados. A TABELA 2.6 a seguir apresenta as categorias de impacto que o método contempla.

TABELA 2.6 - Categorias de impacto do método Eco-Indicator 99.

Categorias principais	Categorias específicas	Unidade	Abrangência de aplicação
Saúde Humana	Mudança climática	DALY	Global
	Depleção da camada de ozônio	DALY	Global
	Carcinogênicos	DALY	Europa
	Inaláveis orgânicos	DALY	Europa
	Inaláveis inorgânicos	DALY	Europa
	Radiação ionizante	DALY	Europa
Qualidade do ecossistema	Ecotoxicidade	PDF*m ² yr	Europa
	Uso da terra	PDF*m ² yr	Suíça
	Acidificação e eutrofização combinadas	PDF*m ² yr	Holanda
Recursos	Recursos minerais	MJ surplus	Global
	Recursos Fósseis	MJ surplus	Global

Fonte: Modificado de Mendes (2013) e Guinée (2001a).

- Danos à saúde humana: é expressa em um indicador também utilizado pelo Banco Mundial e pela Organização Mundial de Saúde (OMS): DALYs (Disability Adjusted Life Years). Este indicador expressa o número de anos perdidos mais o número de anos vividos com incapacidade (MONTEIRO, 2004).
- Danos à qualidade dos ecossistemas: é expressa pela perda de espécies em uma determinada área, em um determinado período de tempo.
- Danos aos recursos: expressa através da energia necessária para a extração dos minerais e combustíveis fósseis consumidos pelo processo avaliado.

2.9 CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

A classificação é uma etapa qualitativa que designa as entradas e saídas do inventário às categorias de impacto. O mecanismo de associação é definido pelo método utilizado. Na primeira etapa, as categorias de impacto são selecionadas. Na classificação, os dados do inventário são relacionados às categorias de impacto específicas. Na caracterização, os dados do inventário são multiplicados por fatores de equivalência para cada categoria de impacto.

Então, todos os parâmetros incluídos na categoria de impacto são somados e é obtido o resultado da categoria de impacto (COLTRO, 2007).

Uma vez que as categorias de impacto foram definidas e que as entradas e saídas inventariadas foram distribuídas nas categorias, necessita-se definir a contribuição relativa de cada entrada e saída nas categorias de impactos selecionadas.

Para caracterizar, as entradas e saídas são multiplicadas pelos seus respectivos fatores de caracterização (FC) antes de serem somados. Os resultados são chamados de escores dos indicadores ambientais. Pennington et al. (2004) apresenta uma equação genérica de caracterização, sendo uma determinada substância que atua sobre o ambiente:

$$\text{Indicador de categoria} = \sum_s \text{Fator de caracterização}_s \times \text{Emissões do inventário}_s \quad (4.1)$$

Os mesmos autores apresentam outra equação que ilustra alguns dos fatores de caracterização que se aproximam da ação sobre o ser humano e o ambiente natural:

$$\begin{aligned} &\text{Fator de} \\ &\text{caracterização}_{(s,i,t)} = \sum_j \left(\frac{\text{Efeito}_{(s,j,t)}}{\text{Emissão}_{(s,i)}} \right) = \sum_j \left(\frac{\text{Destino}_{(s,j,t)}}{\text{Emissão}_{(s,i)}} \right) \cdot \left(\frac{\text{Exposição}_{(s,j,t)}}{\text{Destino}_{(s,j,t)}} \right) \cdot \left(\frac{\text{Efeito}_{(s,j,t)}}{\text{Exposição}_{(s,j,t)}} \right) \end{aligned} \quad (4.2)$$

sendo i o local de emissão, j o local da exposição do receptor e t o período durante o qual existe a contribuição para o impacto.

2.10 INTERPRETAÇÃO E OPORTUNIDADE DE MELHORIAS

Interpretação é a fase da ACV na qual as constatações da análise do inventário e da avaliação do impacto são combinadas, de forma consistente com o objetivo e o escopo, visando alcançar conclusões e recomendações (ABNT, 2001). Além disso, a interpretação deve incluir a identificação dos impactos ambientais significativos, bem como a avaliação do estudo em relação a sua integridade, sensibilidade e consistência. Por fim, deve incluir as conclusões e recomendações de melhorias com a finalidade de reduzir os impactos ambientais significativos (ABNT, 2005).

A fase de interpretação interage com as outras três fases da ACV, isto é, se os

resultados da análise do inventário, ou da avaliação do impacto, não alcançarem os requisitos mínimos definidos no objetivo e escopo, então o inventário deve ser revisto com ações, por exemplo, de alterar as fronteiras do sistema, nova coleta de dados, etc., seguido por uma nova avaliação do impacto de forma mais incorporada. Esse processo iterativo deve ser repetido até que os requisitos sejam atingidos de acordo com os seguintes passos (EEA, 1997): i) identificação das questões ambientais significativas; ii) avaliação da metodologia e resultado, através da sua contribuição, consistência e integridade; e iii) verificação da consistência das conclusões de acordo com os requisitos do objetivo e escopo do estudo.

2.11 ESTUDOS DE ACV DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE MICROALGAS

De acordo com Chowdhury et al. (2012) os impactos ambientais e energéticos do biodiesel microalgal podem ser determinados pela ACV. Portanto, nesta seção serão apresentados os trabalhos mais relevantes encontrados na literatura e cujos resultados têm importância para essa tese a ser desenvolvida, concentrando-se características dos estudos nos últimos anos (2005 até 2015) para avaliar o ciclo de vida da produção de biodiesel de microalgas utilizando a metodologia de ACV. A TABELA 2.7 apresenta informações gerais sobre os modelos e os parágrafos na sua sequência um resumo dos principais trabalhos desenvolvidos na área e suas limitações.

TABELA 2.7 - Características gerais dos principais trabalhos disponíveis sobre ACV do biodiesel de microalgas.

AUTORES - PAÍS	UF	LIMITE	SISTEMA DE CULTIVO	INFRAESTRUTURA	FONTE DOS DADOS	MÉTODO
Aresta et al. 2005 (Itália)	1 MJ de energia produzida de microalgas	Cultivo a obtenção do biodiesel	Lagoa aberta	Não	In loco Literatura	Visual Basic 6.0, COMPUbio
Lardon et al. 2009 (França)	1 MJ de combustível	Cultivo à Combustão do biodiesel	Lagoa aberta	Sim	Dados laboratoriais extrapolados para uma Instalação virtual	CML
Jorquera et al. 2010 (Brasil)	100 ton de biomassa seca	Cultivo à obtenção da biomassa seca	Lagoa aberta FBR tubular FBR placa plana"	Sim		GaBi
Stephenson et al. 2010 (Reino Unido)	1 ton biodiesel	Cultivo à combustão do biodiesel	Lagoa aberta FBR tubular <i>arlift</i>	Sim	Literatura	GaBi EDIP 2003
Sander et al. 2010 (EUA)	1000 MJ biodiesel	Cultivo à distribuição do biodiesel	Lagoa aberta	Não	Literatura	RMEE
Clarens et al. 2010 (EUA)	317 GJ energia biomassa	Cultivo à obtenção da biomassa seca	Lagoa aberta	Sim	Literatura	Crystal Ball
Batan et al. 2010 (EUA)	Não reportado	Cultivo à distribuição do biodiesel	FBR	Não	Literatura	1.8 c GREET
Pardo et al. 2010 (Colômbia)	100.000 ton. biodiesel / ano	Cultivo à combustão do biodiesel	Não reportado	Não	Banco de dados Ecoinvent - Simulação de uma planta de biodiesel (Aspen Plus ®)	SimaPro

AUTORES - PAÍS	UF	LIMITE	SISTEMA DE CULTIVO	INFRAESTRUTURA	FONTE DOS DADOS	MÉTODO
Campbell et al. 2011 (Austrália)	transportar 1 tkm	Cultivo à combustão do biodiesel	Lagoa aberta	Não	Literatura	SimaPro
Clarens et al. 2011 (EUA)	1 VKT Impacte	Cultivo à combustão do biodiesel	Lagoa aberta	Não	Literatura	Crystal Ball
Yang et al. 2011 (EUA)	1 kg biodiesel	Cultivo à obtenção do biodiesel	Lagoa aberta	Não	Literatura	Não reportado
Figueiredo, 2011 (Portugal)	1 kg de biodiesel	Cultivo à obtenção do biodiesel	Lagoa aberta	Não	Literatura	ReCiPe CML 2000
Soratana et al. 2011 (USA)	3650 kg biomassa Microalgal	Cultivo	FBR	Sim	Literatura	TRACI
Sing e Olsen, 2011 (Dinamarca)	Não reportado	Não reportado	Não reportado	Não reportado	Literatura	Não reportado
Brentner et al. 2011 (EUA)	10 GJ de biodiesel	Cultivo a obtenção do biodiesel	Lagoa aberta, FBR em coluna; FBR tubulares; FBR placa plana	Sim	Literatura	SimaPro
Dufour et al. 2011 (Espanha)	1 kg de biodiesel	Cultivo a obtenção do biodiesel	Lagoa aberta, FBR tubular; FBR placa plana	Sim	Banco de dados Ecoinvent Literatura	GaBi 4.3
Hou et al. 2011 (China)	1 MJ de energia	Cultivo à Combustão do biodiesel	Não reportado	Não	Literatura	GaBi

AUTORES - PAÍS	UF	LIMITE	SISTEMA DE CULTIVO	INFRAESTRUTURA	FONTE DOS DADOS	MÉTODO
Resurreccion et al. 2012 (EUA)	20.000 VKT Impacte	Cultivo à Combustão do biodiesel	Lagoa aberta FBR tubular horizontal	Sim	Literatura	Crystal Ball
Wibul et al. 2012 (Tailândia)	1 MJ de biodiesel	Cultivo a obtenção do biodiesel	Não reportado	Não reportado	Não reportado	SimaPro
Yanfen et al. 2012 (China)	1 ton de biodiesel microalgal	Cultivo à Combustão do biodiesel	Lagoa aberta	Sim	Literatura	Não reportado
Itoiz et al. 2012 (Espanha)	1 kg de biomassa de microalgas seca	Cultivo a obtenção da biomassa seca	FBR de bolha coluna	Sim	In loco	SimaPro
Chowdhury et al. 2012 (EUA)	1 ton de biomassa de microalgas seca	Cultivo a obtenção do biodiesel	Lagoa aberta	Não	Literatura banco de dados EIO LCA	Não reportado
Passell et al. 2013 (EUA)	1 MJ de energia	Cultivo à Combustão do biodiesel	Lagoa aberta	Não	Seambiotic, Inc	SimaPro
Silva et al. 2013 (Brasil)	Biomassa de microalgas	Cultivo a obtenção da biomassa	Lagoa aberta FBR tubular	Sim	In loco	SimaPro
Ajayebi et al. 2013 (India)	1 kg de biodiesel	Cultivo à Combustão do biodiesel	Lagoa aberta	Sim	Dados laboratoriais - Dados laboratoriais extrapolados para uma Instalação hipotética	SimaPro

AUTORES - PAÍS	UF	LIMITE	SISTEMA DE CULTIVO	INFRAESTRUTURA	FONTE DOS DADOS	MÉTODO
O'Connell et al. 2013 (EUA)	1 ton de biodiesel	Recuperação da biomassa a obtenção do biodiesel	Não reportado	Não	In loco Ecoinvent	SimaPro
Adesanya et al. 2014 (Reino Unido)	1 ton de biodiesel	Cultivo à Combustão do biodiesel	Lagoa aberta FBR tubular airlift	Sim	Literatura Ecoinvent	Open LCA v.1.3
Soratana et al. 2014 (EUA)	2 milhões de litros de biodiesel de microalgas por ano	Cultivo a obtenção do biodiesel	FBR placa plana	Sim	Literatura	Traci
Canter et al. 2014 (EUA)	1 MJ de combustivel	Cultivo a obtenção do biodiesel	Lagoas abertas	Sim	Literatura	GREeT 2

Nota: VKT - Impacto dos quilômetros percorrido pelo veículo. tkm – Tonelada por quilometro. MJ – Megajoule. GJ – Gigajoule.

A TABELA 2.7 permite obter uma visão geral do que até o momento foi estudado na produção de biodiesel a partir de microalgas nos últimos anos. E como se pode verificar o horizonte geográfico destes estudos na sua maioria diz respeito ao Continente Europeu e Americano. Verifica-se também que o cultivo das microalgas em geral é feito em lagoas abertas ou fotobiorreatores.

A partir do levantamento sobre o estado da arte nota-se que a metodologia de ACV tem sido utilizada para investigar os impactos da produção de combustível à base de microalgas, porém, muitos estudos não incluem as emissões relacionadas à etapa de construção dos sistemas de cultivo, como é o caso do trabalho de Aresta et al. (2005). Seu estudo baseou-se em macroalgas e microalgas cultivadas em lagoas abertas, e demonstrou o benefício de energia oriunda da reciclagem de carbono e fixação de CO₂ por esses organismos, associado com a utilização de águas residuais como fonte de nutrientes. Nesse trabalho foi enfatizado que o ganho líquido de energia depende da tecnologia de conversão do óleo de biodiesel.

Além de Aresta et al. (2005) comprovarem benefícios associados à utilização de águas residuais, outros autores também indicam seu uso nos cultivos das microalgas, assim reduzindo entrada de nutrientes químicos (Lardon et al., 2009), e com isso as necessidades de nutrientes e de água no cultivo de biomassa microalgal podem ser totalmente satisfeitas pelo uso de efluentes provenientes do tratamento secundário de águas residuais (SANDER e MURTHY, 2010; SINGH e OLSEN, 2011; YANG et al., 2011).

Outro trabalho relevante para essa tese é o de Stephenson et al. (2010) que compara energética e ambientalmente os cultivos em sistemas abertos e fechados de uma operação hipotética, e conclui que cultivos em fobiorreatores tubulares do tipo *arlift* consomem significativamente mais energia do que o cultivo em lagoas abertas e o potencial de aquecimento global (PAG) também é maior. Porém, quando comparado o biodiesel produzido a partir de *C. vulgaris* cultivada em lagoas abertas com o diesel de origem fóssil, a exigência de energia fóssil e PAG para o biodiesel são mais baixas. E concluem que o desempenho ambiental do biocombustível é altamente dependente do sistema de cultivo selecionado.

No entanto, o próprio autor ressalta que existe uma necessidade urgente de ensaios em escala piloto de produção de biodiesel de microalgas para permitir o conhecimento de reais ACVs, uma vez que seu trabalho utilizou dados da literatura, assim o trabalho de Clarens et al. (2010), que combinaram dados anteriormente publicados de demonstrações em escala piloto, e determinaram os impactos associados à produção de microalgas cultivadas em lagoas abertas. Usaram um modelo de ciclo de vida estocástica comparada com culturas terrestres (canola, milho e gramíneas), e os resultados indicaram que a culturas terrestres apresentaram menores

impactos ambientais do que as microalgas sobre o uso de energia, água e emissão de GEE, independentemente do local de crescimento. E apresentaram que apenas para o potencial de eutrofização e ocupação do solo as microalgas se mostraram superiores, onde a exigência de terra para produzir uma unidade de energia derivada de microalgas é muito menor que a das culturas terrestres.

Outros autores como Batan et al. (2010) propuseram um modelo detalhado em escala industrial utilizando dados disponíveis na literatura para microalgas cultivadas em fotobiorreatores. Este modelo integra o balanço energético e a análise de emissões de GEE durante todo o ciclo de vida, e compara com o diesel e biodiesel (soja). Em resumo, a análise mostra que o ciclo de vida do processo de biodiesel de microalgas requer menos uso de energia por unidade produzida. Estes resultados mostram que biocombustíveis a base de soja e microalgas podem realizar reduções de GEE em relação ao óleo diesel, devido à captura intrínseca de CO₂ nas fases de crescimento da biomassa através da fotossíntese.

Em relação à utilização de diferentes materiais utilizados na construção dos FBRs Soratana e Landis (2011), realizaram uma avaliação do ciclo de vida comparativa do cultivo de microalgas em fotobiorreatores (a partir da utilização de diferentes materiais de construção), e compararam os impactos ambientais da utilização dos resíduos e de fontes sintéticas para proporcionar nutrientes e CO₂ para os cultivos. E concluíram que a seleção do material do FBR contribui para os impactos no cultivo das microalgas nas categorias de acidificação e esgotamento da camada de ozônio.

Portanto, a importância da seleção de materiais é evidente na construção de fotobiorreatores para o desenvolvimento de equipamentos de escala industrial. No entanto, nesse trabalho (SORATANA e LANDIS, 2009) não foram incluídas etapas posteriores à produção do biodiesel de microalgas, nem outros recursos como uso de água e solo, assim como, os dados utilizados na análise foram provenientes da literatura.

Em um estudo mais completo, é realizada uma ACV que compara vários sistemas de cultivo para a produção de biodiesel de microalgas, e uma série de opções tecnológicas são considerados para cada etapa do processo, e a opção ideal para cada etapa do processo é selecionado gerando um melhor cenário (BRENTNER et al., 2011). Nesse estudo, os autores concluíram que o melhor sistema de cultivo é o realizado em reatores do tipo tela plana, que foi desenvolvido para ter o menor impacto para todas as categorias selecionadas (exceto pelo uso da terra), seguido da centrifugação, secagem e extração do óleo com hexano, transesterificação com metanol e deposição de biomassa residual.

Brentner et al. (2011) enfatizam que devem ser realizados melhorias nos processos, especialmente nas tecnologias de recuperação da biomassa microalgal e complementam a falta da disponibilidade dos dados dos trabalhos encontrados na literatura, com os quais foram realizadas as ACVs e obtidos os resultados apresentados. Ressaltam também, que a cooperação e participação da indústria de produção microalgas, pela partilha de dados operacionais relevantes será fundamental para rastrear com precisão o desempenho do ciclo de vida do biodiesel de microalgas e bioprodutos associados, permitindo uma melhor aplicação das pesquisas de ACV e análise transparente, para apoiar o crescimento sustentável da indústria (BRENTNER et al., 2011).

No entanto, vale lembrar que o trabalho relatado acima, utilizou em grande parte dados secundários relatados na literatura, e que os avanços tecnológicos estão acontecendo rapidamente na indústria de microalgas, de modo que os atrasos inerentes à publicação dos dados podem resultar em fatores obsoletos sendo assumidas em modelos econômicos e ambientais.

Wilbul et al. (2012) analisaram o PAG e o retorno de energia líquida (REL) da produção de biodiesel de microalgas através da ACV, comparativamente com o biodiesel de canola e soja. E com base nos resultados concluíram que a absorção de CO₂ durante o cultivo da biomassa microalgal tem um melhor desempenho quando comparado com diesel convencional e biodiesel produzido a partir de canola e de soja, podendo o processo de cultivo de microalgas reduzir em até 25% as emissões de GEE (kg CO₂ equivalente), porém, para a obtenção do biodiesel de microalgas há uma alta entrada de energia quando comparado com o diesel, biodiesel de canola e soja.

No entanto, dos trabalhos encontrados na literatura apenas Itoiz et al. (2012) e Passel et al. (2013) consideram dados *in loco*, o primeiro utilizou dados coletados *in loco* de um sistema de cultivo em FBR do tipo coluna de bolha, porém o mesmo apenas considerou os impactos associados para a obtenção da biomassa microalgal seca, excluindo as etapas de extração do óleo e conversão em biodiesel, e o segundo considerou o cultivo em lagoa aberta para a obtenção do biodiesel.

Além disso, vale lembrar que vários autores compararam uma tecnologia relativamente imatura (produção de biodiesel de microalgas) com tecnologia tecnicamente consolidada (biodiesel de soja, canola e diesel de origem fóssil). No entanto, avanços podem permitir que as microalgas desempenhem um papel importante no atendimento à demanda futura de energia e redução dos impactos ambientais associados, melhorando os sistemas de cultivo, métodos de recuperação da biomassa e uso de energia renovável, produtividades de biomassa mais elevadas, a reciclagem de nutrientes, e outros tipos semelhantes de avanços.

Quanto a estudos referentes à ACV de microalgas para biodiesel no Brasil, foi identificado o trabalho de Jorquera et al. (2010), que comparou a produção de microalgas em lagoas abertas com a produção em fotobiorreatores de placas plana, examinando o REL. O estudo diz que ambos os sistemas de cultivo podem ser considerados economicamente viáveis para a microalga *Nannochloropsis* sp., para fins de geração de biocombustíveis, no entanto, no cultivo em FBRs, o REL foi menor que a energia necessária para produzir a unidade funcional do que o cultivo em lagoas que o REL foi maior que o da unidade. Porém, nesse estudo a fronteira do sistema não considera a transformação da biomassa em biodiesel.

Outro estudo de ACV referente a biodiesel de microalgas no Brasil, pode ser citado o trabalho da autora dessa tese juntamente com colaboradores (SILVA et al., 2013) onde apresentaram uma ACV da produção de biomassa de microalgas em escala piloto em sistemas de FBR tubular compacto industrial (2 x 5 x 8 m) para a geração de biocombustíveis e/ou eletricidade. Nesse estudo, foi verificado, que a associação dos efeitos da produção de aço, do PVC e a embalagem dos tubos contribuem para em mais de 85% do total dos impactos ambientais do sistema. No entanto, o uso de FBR compactos para cultivo de microalgas tem o potencial de causar menor impacto sobre o meio ambiente comparado com lagoas abertas, devido à menor ocupação de área e uma alta produtividade. Porém, para alcançar uma produção de biomassa com redução dos impactos e sustentabilidade, a utilização de aço e PVC precisa ser minimizada, assim como materiais de embalagem.

No entanto, esse trabalho apresenta algumas limitações, por não considerar todas as etapas da produção para obtenção do biodiesel de microalgas (etapas posteriores à obtenção da biomassa microalgal, como: extração e obtenção do biodiesel), além do consumo energético não considerado dos equipamentos elétricos (compressor e bombas de recirculação).

Outro trabalho que considera a produção de biodiesel em larga escala é o de Ajayebi et al. (2013), que avaliaram o biodiesel de microalgas e pinhão manso. Esse trabalho objetivou avaliar as potenciais vantagens entre estas duas vias de biodiesel em relação ao diesel fóssil. Os resultados indicam que o desempenho ambiental de biodiesel de microalgas é comparável à do pinhão manso. Ambos mostram significativas reduções de emissões de GEE e do esgotamento energia fóssil em relação ao diesel fóssil. Assim, o biodiesel de microalgas pode ser considerado um potencial combustível para o transporte sustentável na Índia, além do biodiesel de pinhão manso.

E por fim, um trabalho recentemente publicado (CANTER et al., 2014) objetivou-se avaliar as emissões de GEE relacionadas com a infraestrutura de lagoas abertas para o cultivo das microalgas. Em resumo, os autores concluíram que o ciclo vida da infraestrutura contribuiu

com uma parcela surpreendentemente significativa nas emissões de GEE, mesmo quando as produtividades elevadas de biomassa de microalgas são consideradas. As emissões de GEE associadas com materiais de infraestrutura configuraram 12% do total das emissões da produção do biodiesel, sendo o plástico e o concreto que apresentaram a maior influência sobre as emissões de GEE na análise de sensibilidade.

A partir dessa revisão bibliográfica nota-se que na maioria dos trabalhos de ACV da produção de biodiesel de microalgas as emissões relacionadas à infraestrutura necessária para obtenção do biodiesel são por vezes são omitidas durante as análises, e mesmo que o trabalho de Canter et al. (2014), considerou essa lacuna, ainda nota-se a falta de trabalhos que consideram mais de um sistema de cultivo e incluam as análises das emissões da infraestrutura para produção de biodiesel de microalgas em larga piloto ou industrial.

É possível notar também, que nos últimos anos, pelo menos 29 (vinte e nove) estudos de ACV avaliaram o desempenho dos sistemas de cultivos. Embora os resultados destes estudos não sejam diretamente comparáveis (LIU et al., 2012), várias tendências surgiram, como: à medida que o consumo de energia a montante (e outros impactos) associados com o CO₂ e uso nutrientes (N e P) necessários para o crescimento das microalgas, levou muitos autores a recomendar o uso de CO₂ reciclado (a partir do gás de combustão) e de N e P a partir efluentes ou águas residuais para melhorar o desempenho geral da ACV (CLARENS et al., 2010, 2011; KADAM, 2001; SANDER e MURTHY, 2010; STURM e LAMER, 2011).

Além disso, nota-se que a maioria dos trabalhos não aborda aspectos como: seleção de espécies, alcance de uma maior eficiência fotossintética, desenvolvimento de sistemas de produção, aperfeiçoamento do balanço energético após a contabilização de operações no bombeamento de água, transferência de CO₂, colheita, extração e processamento, mais pesquisas com plantas em larga escala, aproveitamento de gases de combustão, dentre outros (BRENNAN e OWENDE, 2010; CHISTI, 2007; MATA et al., 2010).

Dos artigos analisados na revisão bibliográfica, também se pode observar que o biodiesel de microalgas é uma realidade, no entanto, ainda faltam quebrar algumas barreiras relativamente à sua produção. Verifica-se que as grandes vantagens da cultura das microalgas são a área – que é muito reduzida quando comparada com outras culturas de fontes de biodiesel – e a água onde crescem – pois a sua qualidade não afeta fortemente o crescimento das microalgas.

Verifica-se também, que a escolha da metodologia escolhida nos trabalhos apresentados, é bastante variada. Isso porque a metodologia a ser usada deve ser escolhida atendendo em primeiro lugar ao objeto final de estudo, para que se possam recolher todos os dados necessários à obtenção do mesmo. O objetivo de avaliar diferentes fatores resultantes da produção do

biodiesel obriga à escolha de um método de análise adequado ao mesmo. Por isso essa variedade de métodos utilizados nos últimos anos em estudos de ACV da produção de biodiesel de microalgas.

Além disso, em relação aos trabalhos descritos anteriormente, destacam-se as seguintes observações:

- 1) De modo geral, os resultados são bastante discutidos sob uma perspectiva energética da avaliação, comparando o custo para a produção do biodiesel com o REL dessa energia em forma de combustível, além dos impactos associados a esse biocombustível comparado com outros de fontes terrestres (CLARENS et al., 2010; JORQUERA et al., 2010; COLLET et al., 2011);
- 2) Nota-se que a maioria dos trabalhos de ACV sobre o biodiesel de microalgas, relacionam o uso da microalga como combustível, as suas emissões de gases de efeito estufa e as necessidades energéticas, no entanto outros indicadores ambientais devem ser considerados como, necessidades do uso do solo, o uso de água e o potencial de eutrofização, assim caracterizando de forma precisa e completa o atual estado de conhecimento à volta dos biocombustíveis de microalgas;
- 3) Observa-se também a falta da disponibilidade dos dados, com os quais foram realizadas as ACVs e obtidos os resultados apresentados. E segundo Brentner et al. (2011) a cooperação e participação da indústria de produção microalgas, através da partilha de dados operacionais relevantes, será fundamental para rastrear com precisão o desempenho do ciclo de vida do biodiesel de microalgas e bioprodutos associados, permitindo melhor aplicação das pesquisas de ACV e análises transparentes para apoiar o crescimento sustentável da indústria;
- 4) Como se pode verificar ao longo do capítulo consoante as escolhas metodológicas efetuadas, obtêm-se resultados bastante distintos, tal como verifica-se claramente nas emissões de GEE e nas necessidades energéticas;
- 5) Em sua maioria, os resultados demonstraram que o custo energético para a produção das microalgas é o principal gargalo do processo produtivo, como a etapa de produção de nutrientes e a etapa de recuperação da biomassa microalga (COLLET et al., 2011; CLARENS et al., 2010; CHISTI, 2007; SANDER e MURTHY, 2010; CAMPBELL et al., 2010; PARDO et al., 2010; JORQUERA et al., 2010; LARDON et al., 2009);
- 6) Nota-se que não há nenhum estudo de ACV adequado para a produção de microalgas, pois não há dados de plantas comerciais disponíveis comparados com lagoas abertas, contemplando todas as etapas da produção do biodiesel de microalgas, e esses dados colaborariam para que se obtivesse um quadro mais claro da situação (SINGH e GU, 2010);
- 7) Atualmente, a maioria dos estudos de ACV que utilizam microalgas para fins de

biocombustíveis têm sido realizados com dados laboratoriais ou em escala piloto, e até mesmo estudos hipotéticos (STEPHENSON et al., 2010; LARDON et al., 2009; PARDO et al., 2010), além dos estudos de revisão (SINGH e OLSEN et al., 2011; JORQUERA et al., 2010), enquanto se aguarda a escala industrial para demonstrar a viabilidade de produção (RODOLI et al., 2008; LIANG et al., 2009);

8) Além disso, estudos disponíveis, muitas vezes contêm uma mistura de dados experimentais com dados assumidos ou modelado, e uma falta de transparência a este respeito, juntamente com diferentes níveis de entradas resultantes da agregação de dados, tornando-se difícil comparações de aspectos individuais os estudos;

9) Com base na revisão bibliográfica, é bastante claro que, a fim de atingir a escala industrial da produção de biodiesel de microalgas, pesquisas são necessárias para abordar as várias questões que ainda impedem como fonte de energia promissora de ser uma realidade (SILVA, et al., 2013);

10) A concepção de um sistema de conversão das microalgas requer a combinação e otimização de vários fatores, como cultivo da biomassa, fornecimento de nutrientes e CO₂, o transporte para as instalações de conversão, secagem, separação de produtos, reciclagem, gestão de resíduos, transporte de produtos e comercialização (PATIL et al. 2008; SINGH e OLSEN, 2011);

11) Por fim, vale ressaltar também, que como acontece com qualquer nova tecnologia, a sustentabilidade em longo prazo da produção de microalgas, bem como seus impactos sobre o meio ambiente são preocupações críticas, e estas questões merecem uma atenção especial.

2.12 DESAFIOS

A revisão bibliográfica apresentou o contexto que os estudos encontrados na literatura técnico-científica utilizam dados de escala laboratorial, extrapolações de dados laboratoriais, estudos teóricos e/ou outros tipos de literatura. Portanto, uma ACV com dados atuais de cultivos, colheita, métodos de processamento e produção de biodiesel de microalgas em escala piloto como instalado no NPDEAS, será útil para demonstrar o estado atual da produção de biodiesel de microalgas, fornecendo uma linha de base para os futuros trabalhos de ACV de maiores instalações de produção de biodiesel de microalgas e os futuros avanços tecnológicos na área.

Portanto, baseando-se na revisão bibliográfica realizada, são listados os seguintes desafios científicos para o avanço do estado-da-arte no assunto segundo a visão da autora:

- Nota-se que o custo do processamento da biomassa ainda é alto, sendo necessário o desenvolvimento de processos de baixo custo para cultivo, colheita, transporte e pré-

tratamento de resíduos;

- Utilizar organismos geneticamente modificados capazes de aumentar a produção de óleo;
- Buscar entendimento de como melhorar economicamente o processo via integração da produção biodiesel com outros produtos (por exemplo, bioetanol, ração animal, pigmentos) a partir da mesma biomassa de microalgas produzida;
- Realizar um estudo de ACV que contemple dados de uma planta de produção de biodiesel de microalgas em escala piloto ou industrial em funcionamento comparado com cultivos em lagoas abertas;
- Realizar estudos de ACV que considerem a infraestrutura necessária para o processo de produção de biodiesel de microalgas desde a extração das matérias-primas até o descarte considerando diferentes tecnologias disponíveis em todas as etapas;
- Estudos que comparem o melhor cenário das tecnologias disponíveis para a produção de biodiesel de microalgas com a produção de biodiesel de outras matérias-primas.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Baseado nos desafios listados no item 2.12, define-se como objetivo geral desta tese de doutorado, avaliar a sustentabilidade do modelo de produção de biodiesel de microalgas cultivadas em fotobiorreatores compactos industriais utilizando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com o intuito de atingir o objetivo geral, listam-se os seguintes objetivos específicos:

- a. Apresentar o método de ACV empregado, definir a fronteira do sistema e a unidade funcional;
- b. Identificar e descrever as etapas do sistema de produção do biodiesel de microalgas no NPDEAS considerando as opções tecnológicas utilizadas e as várias combinações de tecnologia, além disso, quantificar os fluxos de entrada e saída do sistema;
- c. Caracterizar e quantificar os impactos ambientais do ciclo de vida, identificar a(s) fase(s) de ciclo de vida que mais contribuem para os impactos ambientais e apontar possíveis oportunidades de melhoria no sistema em estudo através da análise de sensibilidade das etapas;
- d. Identificar a opção tecnológica mais adequada para cada etapa do processo, apontando a configuração ambiental com menor impacto para a produção do biodiesel de microalgas e compará-la com os biodieseis a base de soja, palma e canola.

4 METODOLOGIA

Nesta seção serão apresentados os procedimentos e condições experimentais, tais como, material e equipamentos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa.

4.1 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) EMPREGADO

Os princípios da ACV utilizado neste trabalho são recomendados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (SAIC - *Scientific Applications International Corporation*, 2006), e de acordo com a série ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006).

4.1.1 Fronteiras do sistema e identificação das etapas do sistema de produção de biodiesel no NPDEAS

A fronteira do sistema nesse trabalho inclui a montagem dos sistemas de cultivo (lagoa e FBR), seguido do cultivo realizado nos mesmos, que tem como principais entradas de insumos de produção: energia solar, água, CO₂ e outros nutrientes como nitrogênio e fósforo para o crescimento das microalgas. E para a etapa de recuperação da biomassa, serão avaliadas quatro opções: a floculação, a filtração, centrifugação e a secagem térmica da biomassa, a fim de avaliar qual opção tecnológica apresenta o melhor desempenho ambiental. Após essa etapa, a biomassa com um menor teor de umidade, segue para a etapa de extração do óleo da biomassa, seguida da conversão dos ácidos graxos em biodiesel através da esterificação enzimática.

Para o cenário em análise, serão considerados a produção e o transporte das matérias-primas utilizadas no cultivo, bem como a geração de efluentes e resíduos deste mesmo processo. Para essa tese de doutorado define-se o sistema do produto desde a extração dos recursos naturais, montagem dos sistemas de cultivo à obtenção do biodiesel de microalgas, conforme demonstrado na FIGURA 4.1.

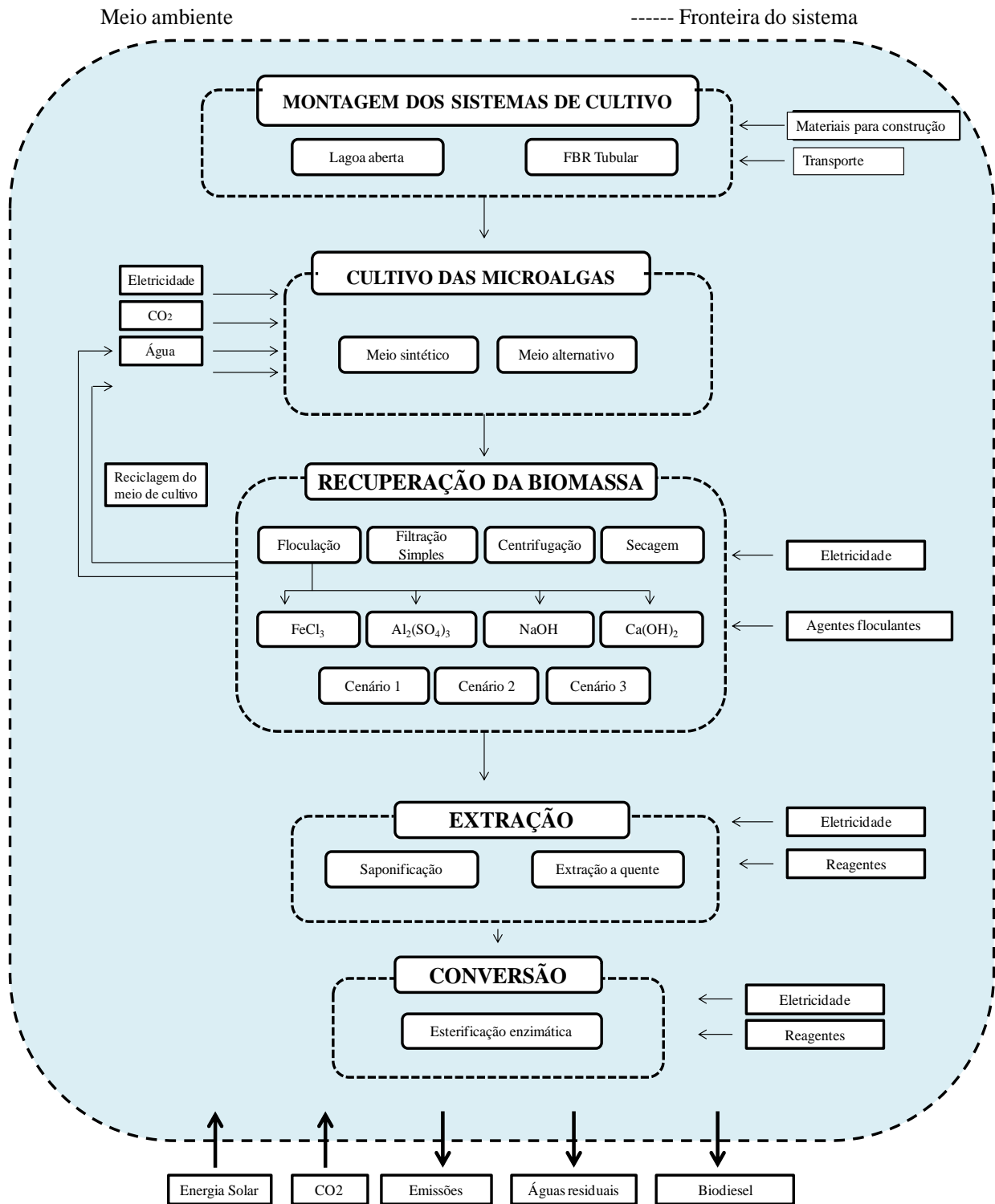


FIGURA 4.1. Limite do sistema e descrição dos processos do modelo de produção de biodiesel de microalgas estudado. Fonte: A autora (2015).

4.1.2 Unidade funcional

Para este trabalho, definiu-se que a função da microalga é fornecer biomassa para obtenção de compostos de interesse comercial, especialmente lipídios para a produção de biodiesel para gerar energia para motores de ciclo diesel.

Também deve ser estabelecida uma unidade funcional que estabeleça uma quantificação do exercício da função. Assim sendo, definiu-se como unidade funcional a geração de 25 litros de biodiesel, valor este em que todas as entradas e saídas do sistema do produto serão relacionadas.

Uma vez definida a unidade funcional, definiu-se um fluxo de referência para mensurar a quantidade do produto necessário para cumprir a função. Desse modo, são necessário 352 kg de biomassa seca para produzir 25 litros de biodiesel, quantidade esta capaz de garantir o funcionamento do NPDEAS por 8 horas com um consumo de 30 kWh.

Nesses termos, o estudo tem como:

- Função do sistema: obtenção de biomassa de microalgas para produção biodiesel;
- Unidade funcional: produção de 25 litros de biodiesel;
- Fluxo de referência: 352 kg de biomassa seca.

4.1.3 Inventário dos dados do ciclo de vida (ICV)

O sistema em estudo está localizado em Curitiba no estado do Paraná, região Sul do Brasil. Os dados de entrada e saída referentes às etapas da produção de biodiesel de microalgas foram todos coletados no NPDEAS, respectivamente, pertencente à UFPR.

Toda a informação relacionada com a infraestrutura física necessária, nutriente utilizado, e outros fatores que estão associados com a produção de biomassa de microalgas foram obtidos por medições diretas e assim realizado balanço de massa e energia para cada etapa considerada no sistema, com a finalidade de realizar a ACV do processo.

Dados da construção dos sistemas de cultivo, nutrientes para obtenção da biomassa, floculantes foram medidos *in situ*, enquanto os dados relacionados com a produção e distribuição de eletricidade e produção de nutrientes sintéticos foram obtidos a partir do banco de dados Ecoinvent v 2.2 (ECOINVENT, 2010).

Devido à complexidade de obtenção de dados primários do processo de produção do compressor de ar utilizado no sistema de aeração, bombas, floculador, centrífuga e estufa térmica não foram contempladas no presente estudo. Portanto, somente o consumo de energia elétrica

destes foi considerado. Para isso, os dados de energia elétrica foram obtidos a partir do banco de dados Ecoinvent v 2.2 (ECOINVENT, 2010) para a matriz energética brasileira.

4.1.4 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

Para a AICV devido ao grande volume de dados é necessário o uso de recursos computacionais, e para esse estudo utilizou-se o software *SimaPro 7.3*. A escolha desse software foi baseada a partir do levantamento bibliográfico e através da TABELA 2.7 notou-se que o método tem sido bastante utilizado para realizar ACV de estudos baseados na produção de energia a partir das microalgas, assim, complementa-se também que o método é confiável, além de possuir uma base de dados extensa o que facilita a comparação deste trabalho com os demais na literatura.

Para realizar a análise da fase de avaliação do impacto do ciclo de vida neste estudo, foi selecionado o método *midpoint* CML 2000, onde para evitar a utilização de uma unidade para cada categoria, e para facilitar a interpretação dos resultados, os resultados do impacto são apresentados apenas numa base percentual, para cada entrada analisada (material, substância ou serviço), considerando todas as categorias de impacto que o método apresenta.

E também o método *endpoint* Eco-Indicator 99 a categoria de impacto Uso do solo para comparar a área ocupada pela lagoa aberta e pelo FBR.

4.1.5 Interpretação

Neste estudo, a análise de inventário e avaliação de impactos das etapas consideradas foi realizada segundo a ISO 14040 (2006), incluindo (i) a identificação de problemas significativos com base nos resultados das fases ICV e AICV; e (ii) limitações, recomendações e conclusões.

4.2 IDENTIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DO SISTEMA DE PRODUÇÃO DO BIODIESEL DE MICROALGAS E QUANTIFICAÇÃO DOS FLUXOS DE ENTRADA E SAÍDA

As quantidades de materiais necessárias para obtenção dos equipamentos necessários para os processos apresentados na FIGURA 4.2, como por exemplo, o FBR e as lagoas abertas (piscina) foram estimados - mensurados de acordo com informações do fornecedor para determinar o impacto ambiental associado com a construção das instalações necessárias para a

produção do biodiesel de microalgas. Sendo a vida útil de cada peça do equipamento FBR foi assumida como sendo de 20 anos e para a lagoa aberta à vida útil considerada foi de 10 anos, onde o concreto será enviado para aterro final enquanto aço base e produtos de PVC são reciclados. Nas próximas sessões será detalhada cada etapa do processo de produção de biodiesel de microalgas.

4.2.1 Montagem dos sistemas de cultivo

Montagem do sistema aberto (lagoa)

A montagem do sistema aberto de cultivo do NPDEAS consiste em uma piscina de lona plástica de PVC, na qual foi instalado um sistema de mistura e um sistema de abastecimento de ar. Esse sistema de cultivo foi adaptado para simular a lagoa aberta foi instalada uma cobertura de plástico transparente para proteger o cultivo das intempéries, como mostrado na FIGURA 4.2.

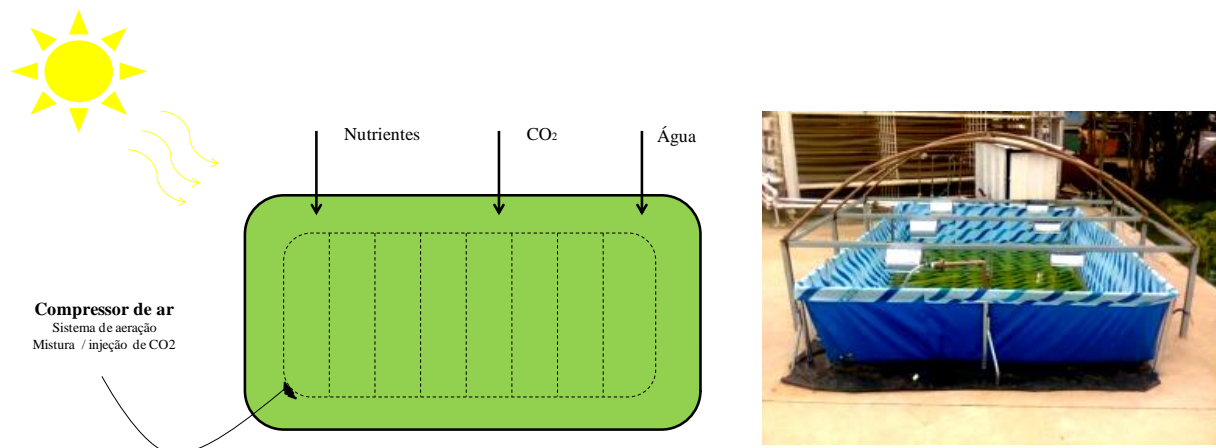


FIGURA 4.2. Ilustração do sistema de cultivo em lagoa aberta com suporte para cobertura plástica. Fonte: Modificado de Dilay (2013).

Para garantir uma mistura adequada de nutrientes e ar contendo CO_2 nesse sistema de cultivo utilizado no NPDEAS, é utilizada a injeção de ar através de compressores de ar. O dióxido de carbono é fornecido por tubagem a partir da central de máquinas do NPDEAS na quantidade de 5 pés cúbicos por minuto ($\text{ft}^3/\text{min.}$) de ar atmosférico.

É importante referir que os consumos de energia e materiais associados à construção das lagoas foram contabilizados para a realização da ACV.

Montagem do sistema fechado (Fotobiorreator tubular compacto)

O principal produto tecnológico produzido pelo grupo consiste no desenvolvimento de

fotobiorreator tubular compacto de 12 mil litros de capacidade e 3,5 km de tubos transparentes arranjados em um espaço de apenas 10 m², amparados por uma estrutura em aço carbono 1020. O FBR é composto por 14 ramais, cada um com volume de aproximado de 600 litros. O equipamento possui patente no Brasil e nos Estados Unidos.

Os FBRs disponíveis no NPDEAS são construídos com tubos de PVC transparentes com poucas partes metálicas, que correspondem a conexões e elementos de sustentação dos componentes transparentes do sistema, conforme FIGURA 4.3. Também foram instaladas conexões acessórias como bombas e reservatórios de água.

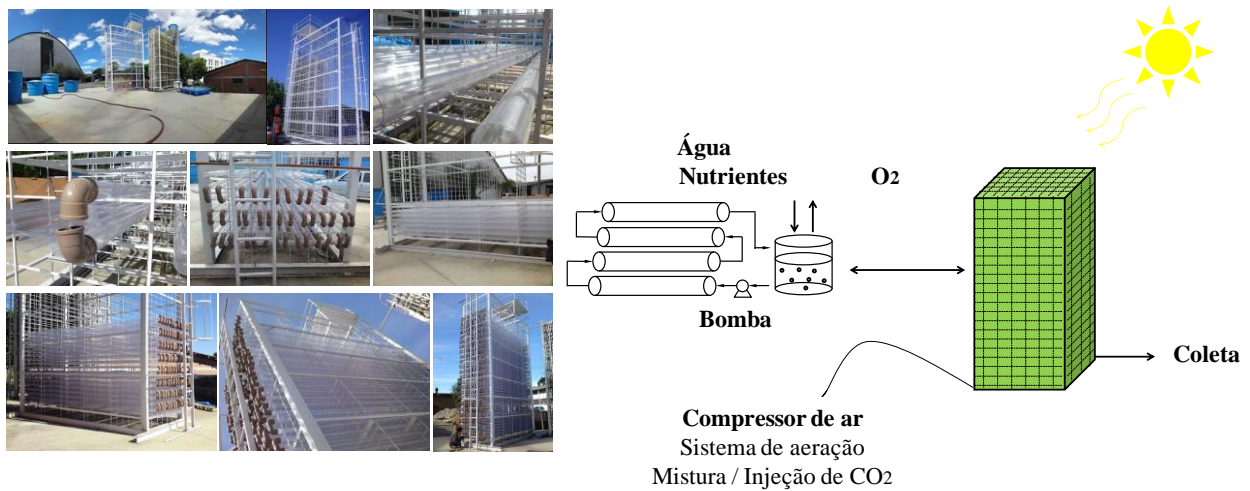


FIGURA 4.3. Etapas do processo de montagem e funcionamento do FBR tubular compacto do NPDEAS. Fonte: Modificado de NPDEAS (2014).

Quantificação dos fluxos de entrada e saída do processo de montagem dos sistemas de cultivo

Os estoques de produção de materiais de construção da FBR foram extraídos do banco de dados do Ecoinvent v 2.2 (ECOINVENT, 2010). A TABELA 4.1, apresenta as entradas e saídas para realização da ACV da etapa de montagem dos sistemas de cultivo.

TABELA 4.1 - Resumo das entradas e saídas do processo de montagem dos sistemas de cultivo.

Entradas	Unidade	Lagoa aberta	FBR tubular compacto	Fonte
Área	m ²	34	10	Dado primário
Aço Carbono - estrutura	kg	90	500	Dado primário
Caixa d'água 10 Mil L - GM Fibras	p	1	1	Dado primário
Caixa d'água 2 Mil L - Fortlev	p	1	1	Dado primário
Fibra de vidro (caixas)	kg	1440	144	Dado primário
Cano PPRC 3/4	kg	50	5	Dado primário
Torneiras PVC	kg	-	0,7	Dado primário
Tubos PVC Transparentes	kg	-	1212,4	Dado primário
Tinta para estrutura branca	L	10	30	Dado primário
Cimento (40 sacos) Itambé	kg	-	2000	Dado primário
Embalagem de papelão	kg	80	160,5	Dado primário
Embalagens plásticas	kg	-	84,7	Dado primário
Areia	m ³	-	4	Dado primário
Pedra brita	m ³	-	4	Dado primário
Aço PA50	kg	-	150	Dado primário
Tinta fundo Zarção (Tinta antes da tinta branca)	kg	10	30	Dado primário
Lona PVC	kg	470	-	Dado primário
Mangueiras de ar - Silicone	kg	70	7	Dado primário
Transporte dos materiais	tkm	34	800	Dado primário
Saídas				
Lagoa aberta	p	1	-	Dado primário
FBR tubular compacto	p	-	1	Dado primário

4.2.2 Cultivo das microalgas

Para o cultivo das microalgas foi utilizado um "mix" de microalgas do gênero *Scenedesmus*, isolada da rede de abastecimento de água de Curitiba (FIGURA 4.4). O "mix" de microalgas utilizada apresenta predominância da espécie *Scenedesmus* sp., e conforme supracitado ela apresenta uma pré-adaptação às condições de cultivo em ambiente externo, aliada ao baixo risco de geração de impacto ambiental em caso de vazamento por se tratar de uma espécie natural da região.

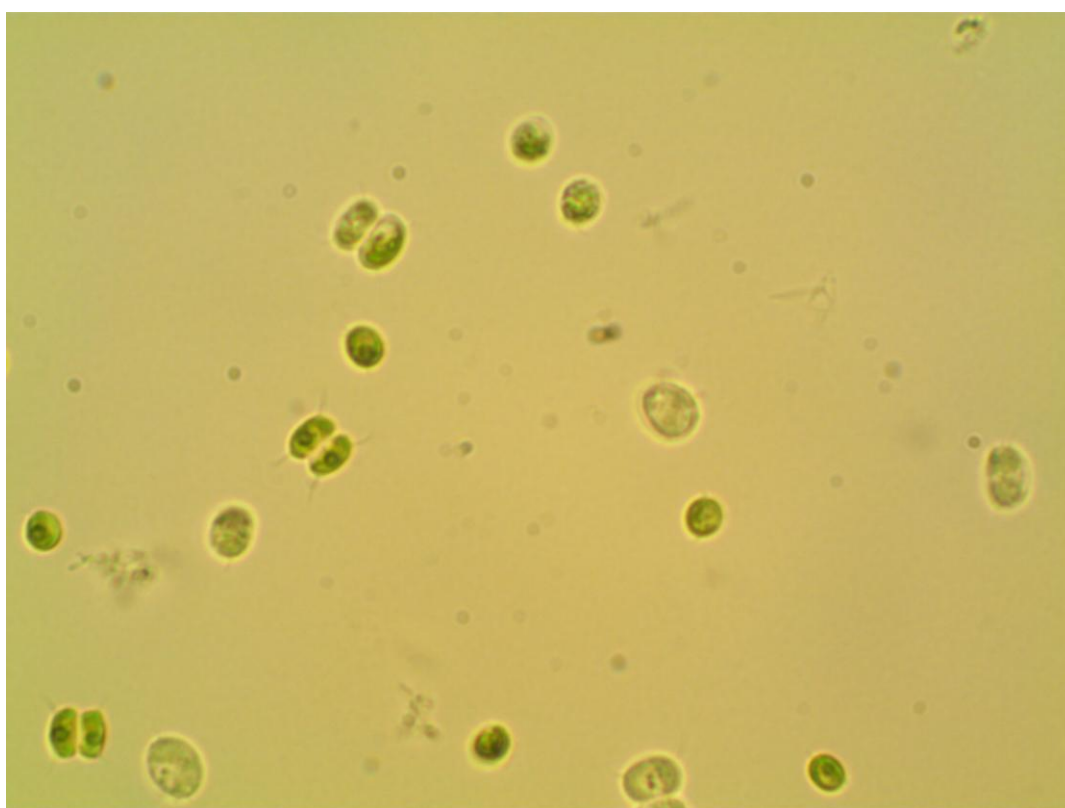


FIGURA 4.4. Micrografia (aumento de 100 vezes em óleo de imersão) do "mix" de microalgas com predominância da *Scenedesmus* sp.

O regime considerado para a realização da ACV é de batelada, com tempo de cultivo do início a retirada para recuperação da biomassa de 20 dias.

Para monitorar o crescimento das células foi utilizado o método de espectrofotometria visível, com medições no comprimento de onda de 540 nm (região que não tem influência da clorofila que absorve em 600 a 800 nm). Uma alíquota de 1,5 ml de amostra foi diariamente coletada (preferencialmente no mesmo horário) em cada um dos reatores para realização das medidas em cubetas de vidro em espectrofotômetro (UV-1600 Pró-Análise), utilizando-se meio de cultivo como branco.

O fotobiorreator tem 14 ramais, no entanto, opera com 12 ramais o que representa uma operação de 85% dos ramais disponíveis. A FIGURA 4.5 apresenta um breve esquema do processo de diluição do FBR. Como pode ser observado no esquema, o cultivo em batelada consiste na retirada de 12 ramais de cultivo para floculação e obtenção de biomassa, e dois ramais são mantidos como inóculo para a próxima batelada de cultivo e posterior acréscimo de meio de cultivo e água para completar o volume retirado.

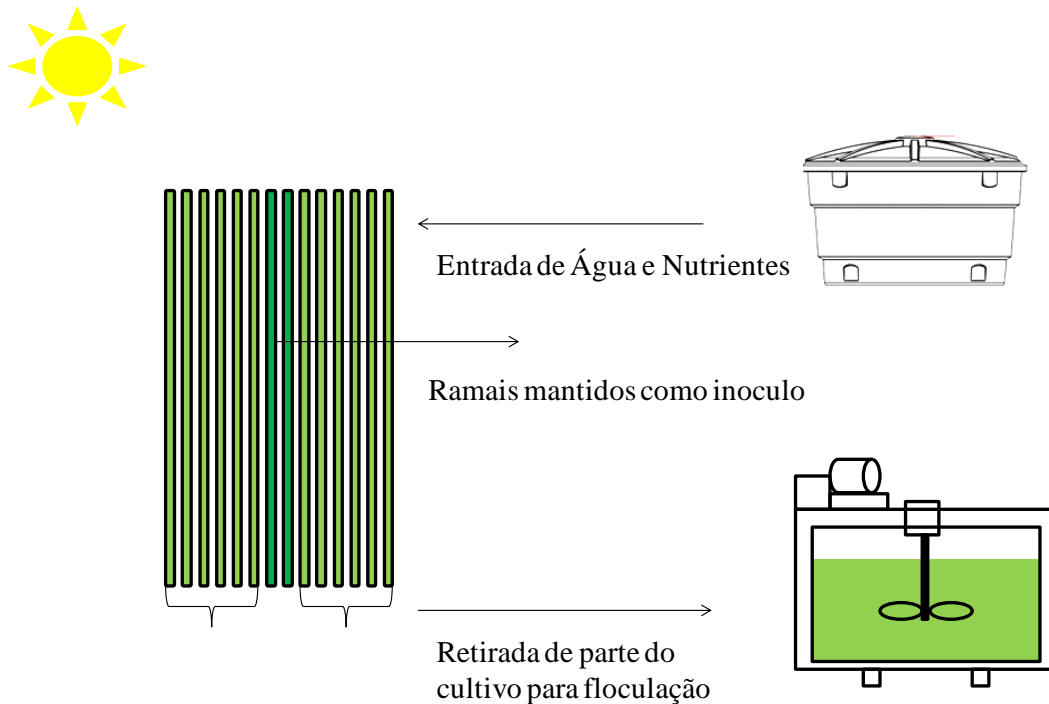


FIGURA 4.5. Esquema de diluição do fotobiorreator. Fonte: A autora (2015).

4.2.2.1 Meios de cultivo

Cultivo com nutrientes sintético

Para os cultivos no NPDEAS, é utilizada a referência de Chu (1942), como base para os cálculos estequiométricos para fornecimento de nutrientes sintéticos no cultivo das microalgas, conforme TABELA abaixo.

TABELA 4.2 - Quantidade de nutrientes utilizados no cultivo de microalgas para o meio Chu.

Reagente	Fórmula	Concentração no meio final (g/L)
Nitrato de sódio	NaNO ₃	0,25
Cloreto de cálcio di-hidratado	CaCl ₂ .2H ₂ O	0,025
Sulfato de magnésio hepta-hidratado	MgSO ₄ .7H ₂ O	0,075
Fosfato de potássio dibásico	K ₂ HPO ₄	0,075
Fosfato de potássio monobásico	KH ₂ PO ₄	0,175
Cloreto de sódio	NaCl	0,025
EDTA	C ₁₀ H ₁₄ N ₂ Na ₂ O ₈ .2H ₂ O	0,05
Hidróxido de potássio	KOH	0,031
Sulfato ferroso hepta-hidratado	FeSO ₄ .7H ₂ O	0,00498
Ácido bórico	H ₃ BO ₃	0,01142
Sulfato de zinco hepta-hidratado	ZnSO ₄ .7H ₂ O	0,00000882
Cloreto manganês tetra-hidratado	MnCl ₂ .4H ₂ O	0,00000144
Molibdato de sódio	Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O	1,19295E-06
Sulfato de cobre penta-hidratado	CuSO ₄ .5H ₂ O	0,00000157
Nitrato de cobalto hexa-hidratado	Co(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	0,00000049

Fonte: Chu (1942).

Cultivo com nutrientes alternativos

Levando em consideração o objetivo do NPDEAS de desenvolver alternativas energéticas sustentáveis, tornou-se imperioso padronizar processos alternativos para a produção de biodiesel de forma sustentável e que visassem à melhoria global do processo por meio da minimização custos e impacto ambiental.

Portanto, verificou-se que devido aos seus teores de matéria orgânica e nutrientes (N e P), conforme apresentado na TABELA 4.3, o efluente suíno se apresenta como uma fonte alternativa de nutrientes para o cultivo de microalgas, devido ao duplo papel que desempenharia o de não poluição dos corpos receptores e o de fonte barata com menor impacto ambiental de nutrientes para o bom curso do processo de produção de biomassa de microalgas no NPDEAS (KIM et al., 2007; RAWAT et al., 2011; CAI et al., 2013).

TABELA 4.3 - Composição do efluente suíno biodigerido.

Parâmetros Avaliados	Efluente suíno biodigerido
Nitrogênio total (N-N _T) (mg.L ⁻¹)	197
DBO ₅ (mg.L ⁻¹)	8100
Fósforo total (P-P _T) (mg.L ⁻¹)	7,623

Fonte: Selesu (2014)

O efluente suíno biodigerido usado em todo o estudo como fonte alternativa de nutrientes a ser implantada no NPDEAS foi obtida do biodigestor modular de fluxo

ascendente e baixo tempo de residência, desenvolvido e construído pelo grupo (SAKUMA, 2013).

Quantificação dos fluxos de entrada e saída do cultivo das microalgas.

Os dados de produção dos nutrientes sintéticos, transporte e produção e distribuição da energia elétrica foram extraídos do banco de dados Ecoinvent v 2.2 (ECOINVENT, 2010). Como fonte de energia elétrica foi utilizada a matriz energética brasileira. Os dados referentes à produtividade dos cultivos das microalgas, consumo de nutrientes e composição dos efluentes gerados no processo seguem os dados primários. A TABELA 4.4 apresenta o resumo das entradas para os cultivos das microalgas com as duas fontes nutricionais consideradas nesse trabalho.

TABELA 4.4 - Resumo das entradas e saídas da etapa de cultivo das microalgas.

Entradas	Unidade	Nutrientes sintéticos	Nutriente alternativo	Fonte
Uso de eletricidade	MJ	95,340	95,340	Dado primário
Água	m³	350	341,250	Dado primário
CO ₂ injetado da atmosfera	kg	644	644	Dado primário
Efluente da suinocultura	L	-	8,750	Dado primário
Nitrato de sódio	g	8,750	-	Chu (1942)
Cloreto de cálcio di-hidratado	g	875	-	Chu (1942)
Sulfato de magnésio hepta-hidratado	g	2,625	-	Chu (1942)
Fosfato de potássio dibásico	g	2,625	-	Chu (1942)
Fosfato de potássio monobásico	g	6,125	-	Chu (1942)
Cloreto de sódio	g	875	-	Chu (1942)
EDTA	g	17,500	-	Chu (1942)
Hidróxido de potássio	g	10,850	-	Chu (1942)
Sulfato ferroso hepta-hidratado	g	1,743	-	Chu (1942)
Ácido bórico	g	3,997	-	Chu (1942)
Sulfato de zinco hepta-hidratado	g	3,087	-	Chu (1942)
Cloreto manganês tetra-hidratado	g	0,504	-	Chu (1942)
Molibdato de sódio	g	0,4165	-	Chu (1942)
Sulfato de cobre penta-hidratado	g	0,5495	-	Chu (1942)
Nitrato de cobalto hexa-hidratado	g	0,1715	-	Chu (1942)
Concentração da biomassa seca	g/l	1	1	Dado primário
Porcentagem de efluente no cultivo	%	-	2,5	Dado primário
Transporte dos insumos	tkm	0,1	-	Dado primário
Emissões evitadas				
Fósforo	mg	-	7,2E6	Dado primário
Amônia	mg	-	3,83E7	Dado primário
Nitrato	mg	-	1,58E7	Dado primário
Nitrito	mg	-	1E4	Dado primário
DQO	mg	-	1,45E8	Dado primário
DBO	mg	-	3,91E7	Dado primário
Nitrogenio total	mg	-	1,04E8	Dado primário
Nitrogenio orgânico	mg	-	5,23E6	Dado primário
Saída				
Volume total do cultivo de microalgas	m³	350	350	Dado primário

Nota: Nesse estudo, para os cultivos com nutrientes alternativos, a demanda por água no cultivo é minimizada uma vez que o efluente da suinocultura é líquido.

Fonte: Chu (1942).

4.2.3 Recuperação da biomassa

O processo de recuperação da biomassa de microalgas encontra-se em aprimoramento no NDPEAS. O objetivo desse esforço consiste na redução do gasto energético, diminuição do tempo de processamento e aumento da qualidade da biomassa de microalgas de modo a contribuir positivamente no desenvolvimento da tecnologia de produção de biocombustível renovável. Dessa forma, as microalgas passam por um processo de floculação que elimina cerca de 80% da água presente na amostra após isso o material floculado pode ser submetido a três processos distintos: filtração simples, centrifugação e secagem térmica.

Essas alternativas podem ser utilizadas a partir da suspensão das microalgas concentrada pela etapa de floculação com auxílio de agentes floculantes, que são utilizados para atingir um baixo teor de umidade antes da extração do óleo. Para a realização da ACV, foram abrangidas as emissões da etapa de recuperação da biomassa, o qual vai ajudar a encontrar a configuração ideal da etapa de recuperação da biomassa.

Floculação

O processo inicia-se com a adição de um floculante, de forma a concentrar as microalgas. A biomassa obtida durante a realização dos cultivos foi floculada utilizando solução estoque dos agentes floculantes considerados, foi preparada dissolvendo-se quantidades apropriadas de floculante em água destilada e deionizada, transferidas para uma unidade de floculação, com um tempo de residência e uma fonte de agitação.

Os testes foram conduzidos com quatro floculantes em condições otimizadas encontrados na literatura (AHMAD et al., 2011, LU CHEN et al., 2013), tal como sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), cloreto de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), cloreto férrico (FeCl_3) e hidróxido de sódio (NaOH), adquiridos da Sigma Aldrich.

Para o processo de floculação, o volume a ser floculado é transferido do sistema de cultivo para um tanque de floculação. Conforme Kim et al (2011) e Wu et al. (2012) a eficiência da floculação foi avaliada por:

$$\text{Eficiência de Floculação (\%)} = \left(1 - \frac{B}{A}\right) \times 100 \quad (4.1)$$

sendo B o sobrenadante e A representa a amostra pura.

Seguiu-se à agitação da solução com agitador mecânico com velocidade de rotação a cada 1 m³ no início de 3355 rpm durante 20 minutos para garantir a homogeneidade da solução, seguida de velocidade mais lenta 1730 rpm durante 100 minutos, garantindo o contato entre as partículas e consequente aglomeração e sedimentação.

O líquido clarificado foi retirado com o auxílio de mangueiras, o qual é retornado para o meio de cultivo, e o espessado ao fundo, que posteriormente foi enviado para a filtração simples ou para a centrifugação, para posterior secagem da biomassa em estufa.

Filtração Simples

Outro método também utilizado no NPDEAS consiste no processo de filtragem simples, onde o concentrado de microalgas passa por filtração em equipamento de configuração simples. A estrutura contém uma lona do tipo *Oxford* que filtra a microalga por gravidade. O processo demora em torno de 24 horas (dependendo o volume a ser filtrado) e ao final obtém-se uma pasta microalgal com menor teor de umidade.

O processo fornece um material com 80% de umidade, e pode ser uma alternativa de baixo custo energético e de capital para o processamento de biomassa de microalgas. Na FIGURA 4.6, pode-se observar a biomassa de microalgas 24 horas após o início da filtração do material floculado. O aspecto é semelhante ao material obtido por centrifugação.



FIGURA 4.6. O aspecto da biomassa obtida após filtragem simples. Fonte: Modificado de NPDEAS (2014).

Centrifugação

Uma dificuldade do processo de produção de biocombustíveis a partir de microalgas consiste no fato de que as concentrações finais dos meios de cultivo apresentam valores baixos (1 - 5 g.L⁻¹), dificultando o processo de separação da matéria-prima.

Outra forma de separar as microalgas é o uso de centrífugas. O NPDEAS trabalha com uma centrífuga da Marca US Centrifuge System M512 com rotações de 3000 rpm com

velocidade de centrifugação de 4 L/min., concentrando 1m³ de cultivo em 5 horas com sistema de carregamento do tipo contínuo.

O material resultando da centrifugação é semelhante ao da etapa de filtração, resultando numa pasta com teor de umidade de 80%. A FIGURA 4.7, apresenta o aspecto da biomassa de microalgas ao final da centrifugação.



FIGURA 4.7. Biomassa de microalgas no cesto da centrífuga durante processo de separação via centrifugação e seu aspecto. Fonte: Modificado de NPDEAS (2014).

Secagem Térmica

Após os processos descritos anteriormente, a biomassa úmida obtida, pode ser submetida à secagem térmica para execução dos experimentos de extração.

A secagem é feita em estufa com ar corrente a 60°C por 48 horas por batelada de secagem de 20 kg de biomassa úmida, dividida em 5 bandejas. A FIGURA 4.8 apresenta o aspecto da biomassa antes de ser submetida à secagem e após.

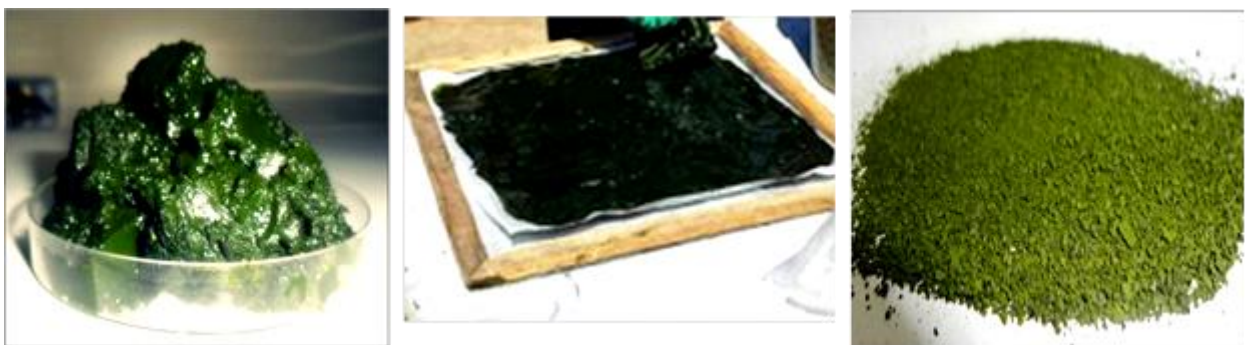


FIGURA 4.8. Secagem térmica da biomassa microalgal e o aspecto após a secagem. Fonte: Modificado de NPDEAS (2014).

Cenários de recuperação da biomassa

A fim de determinar qual o melhor processo frente a redução dos impactos ambientais, foram propostos alguns cenários para avaliação ambiental referente ao acoplamento de tecnologias para a etapa de recuperação da biomassa, apresentados na FIGURA 4.9 a seguir.

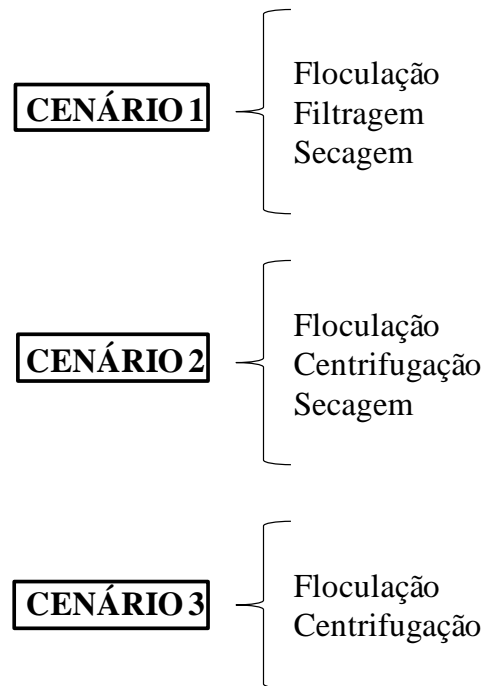


FIGURA 4.9. Acoplamento de tecnologias para a recuperação da biomassa.

Quantificação dos fluxos de entrada e saída da recuperação da biomassa

Para a realização de uma ACV para essa fase do processo de produção de biodiesel de microalgas é necessário fornecer uma análise desse processamento ambientalmente eficiente. Por esta razão, essa etapa consistiu em apresentar como são realizadas os processo de recuperação da biomassa no NPDEAS para realização da ACV e posterior compararem estas tecnologias quando totalmente integradas no processo de produção do biodiesel de microalgas.

Para essa etapa foram estimados os saldos de materiais e de energia para a etapa de recuperação da biomassa considerando as quatro tecnologias descritas, conforme apresenta a TABELA 4.5. As alternativas consideradas serão comparadas para a obtenção da melhor de tecnologia de recuperação da biomassa potencialmente escalável. O total de emissões a partir de cada etapa foi quantificado, a sequência ótima das tecnologias para recuperação da biomassa dos cultivos foi determinada.

Os estudos de ACV foram conduzidos para quantificar as emissões e energia associada ao processo de recuperação da biomassa de microalgas utilizando cloreto férrico,

hidróxido de sódio, hidróxido de cálcio e sulfato de alumínio. A quantidade relevante de cada coagulante necessário para obtenção da unidade funcional foi baseada nos resultados realizados no NPDEAS.

TABELA 4.5 - Resumo das entradas e saídas da etapa de recuperação da biomassa.

Entradas	Unidade	Floculação	Filtragem Simples	Centrifugação	Secagem	Fonte
Floculador	p	1	-	-	-	Dado primário
Filtrador simples	p	-	1	-	-	Dado primário
Centrífuga	p	-	-	1	-	Dado primário
Estufa	p	-	-	-	1	Dado primário
FeCl ₃	kg	52,5	-	-	-	Dado primário
Al ₂ (SO ₄) ₃	kg	105	-	-	-	Dado primário
Ca(OH) ₂	kg	140	-	-	-	Dado primário
NaOH	kg	50,4	-	-	-	Dado primário
Uso de eletricidade	MJ	8,07	-	8,87	35,69	Dado primário
Saída						
Biomassa Úmida (50%)	kg	704	704	704	-	Dado primário
Biomassa Seca	kg	-	-	-	352	Dado primário
Água residual *	L	0	0	0	0	Dado primário
FeCl ₃	kg	52,5	-	-	-	Dado primário
Al ₂ (SO ₄) ₃	kg	105	-	-	-	Dado primário
Ca(OH) ₂	kg	140	-	-	-	Dado primário
NaOH	kg	50,4	-	-	-	Dado primário

Nota: * No estágio em que o NPDEAS se encontra a água residual gerada após a recuperação da biomassa, é retornada ao sistema, sendo utilizada como entrada para o próximo cultivo (minimizando assim as demandas globais de água no cultivo).

4.2.4 Extração do óleo e obtenção do biodiesel de microalgas

As microalgas podem conter várias porcentagens dos lipídios por peso de biomassa seca. Para o caso do sistema de produção de microalgas no NPDEAS, considerou-se o teor de lipídios de 5% a ser extraído a partir da biomassa de microalgas. A extração de lipídios é realizada com a utilização de produtos químicos. A metodologia seguida é discutida e apresentada a seguir.

Metodologia de extração através da saponificação seguida esterificação enzimática.

O processo de extração de ácidos graxos por saponificação foi realizado em escala piloto no Laboratório do NPDEAS da Universidade Federal do Paraná.

O procedimento experimental descrito por González et al. (1988) para extração de ácidos graxos foi adaptada para este trabalho. As reações de saponificação foram realizadas com aproximadamente 704 kg de biomassa úmida de *Scenedesmus* sp..

A hidrólise alcalina dos triacilglicerídeos e ácidos graxos livres ocorreu na presença de NaOH comercial Sodabel® (99% m/m - 0,25 g.g biomassa úmida⁻¹) e álcool etílico (99,5% v/v - 2,5 mL.g biomassa úmida⁻¹) em um reator de mistura encamisado (FIGURA 4.10) na temperatura de 60 °C, durante 1 hora. Em seguida o material foi acidificado no mesmo reator, onde se adicionou o ácido acético (98% v/v - 0,5 mL.g biomassa úmida⁻¹) para neutralizar as cargas dos ácidos graxos. A etapa seguinte foi à extração líquido-líquido com hexano comercial.

Para uma purificação com maior eficiência dos ácidos graxos é executada uma segunda saponificação para remoção dos insaponificáveis.

Após essa etapa seguiu-se a produção de biodiesel a partir de uma reação enzimática (Novozymes Cal-B, 3 mg.g de biomassa úmida⁻¹) com metanol (98% v/v - 0,025 mL.g biomassa úmida⁻¹) em meio hexânico (98% - 0,375 mL.g biomassa úmida⁻¹). A reação foi conduzida por 24 horas a 50 °C. Após a reação o biodiesel produzido foi purificado em uma coluna de bauxita para remoção de pigmentos e contaminantes. A concentração de ésteres foram determinadas pelo Laboratório de Análises de Combustíveis Automotivo (Lacault) de acordo com a Norma EN 14103.



FIGURA 4.10. Reator encamisado utilizado para extração piloto.

Extração a quente com hexano seguida da esterificação enzimática

Para a extração a quente com hexano foram adicionados 833 kg de biomassa seca para 6250 litros de hexano em um reator encamisado com agitação. A extração foi conduzida por 3 horas a 50 °C. Após essa etapa, o extrato hexânico é filtrado em filtros de papel para remoção da biomassa residual. O filtrado é rotaevaporado para remoção do hexano. Como produto final é obtido o óleo bruto de microalgas.

Para a obtenção do biodiesel através desse método de extração foi necessária uma saponificação prévia para remoção dos contaminantes que inviabilizam a reação de esterificação enzimática.

A hidrólise alcalina dos triacilglicerídeos e ácidos graxos livres ocorreu na presença de NaOH comercial Sodabel® (99% m/m - 0,00375 g.g biomassa seca⁻¹) e álcool etílico (99,5% v/v - 0,0375 mL.g biomassa seca⁻¹) em um reator de mistura encamisado, (FIGURA 4.10) na temperatura de 60 °C, durante 1 hora. A etapa seguinte foi à extração líquido-líquido com hexano comercial para remoção dos insaponificáveis. Em seguida o material foi acidificado no mesmo reator, onde se adicionou o ácido acético (98% v/v - 0,075 mL.g biomassa seca⁻¹) para neutralizar as cargas dos ácidos graxos. A etapa seguinte foi à extração líquido-líquido com hexano comercial para extração dos ácidos graxos do meio aquoso.

Após essa etapa seguiu-se a produção de biodiesel a partir de uma reação enzimática (Novozymes Cal-B, 1,5 mg.g de biomassa seca⁻¹) com metanol (98% v/v - 0,0125 mL.g

biomassa seca⁻¹) em meio hexânico (98% - 0,1875 mL.g biomassa seca⁻¹). A reação foi conduzida por 24 horas a 50 °C. Após a reação o biodiesel produzido foi purificado em uma coluna de bauxita para remoção de pigmentos e contaminantes.

Quantificação dos fluxos de entrada e saída da extração e conversão dos ácidos graxos de microalgas

TABELA 4.6 - Resumo dos parâmetros operacionais da etapa de extração dos ácidos graxos.

Entradas	Unidade	Saponificação	Extração a quente com hexano	Fonte
Biomassa microalgal 50% umidade	kg	832	-	Dado primário
Biomassa microalgal seca	kg	-	833	Dado primário
Etanol	L	2082	-	Dado primário
Hidróxido de Sódio	kg	108	-	Dado primário
Ácido acético	kg	416	0,093	Dado primário
Hexano	L	-	6250	Dado primário
Uso de eletricidade	kJ	1311	3933	Dado primário
Saída				
Óleo de microalgas	L	25	25	Dado primário
Etanol residual	L	2082	-	Dado primário
Hexano residual*	L	-	0	Dado primário
Hidróxido de Sódio	kg	108	-	Dado primário
Ácido acético	kg	416	0,093	Dado primário

*Recuperado por rotaevaporação

TABELA 4.7 - Resumo dos parâmetros operacionais para reação enzimática dos ácidos graxos em biodiesel de microalgas.

Entradas	Unidade	Esterificação do óleo obtido através da saponificação	Esterificação do óleo obtido através extração a quente	Fonte
Metanol	L	21	10,41	Dado primário
Bauxita ativada	kg	1,3	1,3	Dado primário
Hexano	L	312	156	Dado primário
Uso de eletricidade	kJ	66	66	Dado primário
Enzima	g	250	124,9	Dado primário
Saída				
Biodiesel	L	25	25	Dado primário
Metanol residual	L	21	10,41	Dado primário
Hexano residual*	L	0	0	Dado primário
Enzima*	kg	0	0	Dado primário
Bauxita ativa residual	kg	1,3	1,3	Dado primário

*Recuperados

4.3 CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS E IDENTIFICAÇÃO DAS OPORTUNIDADES DE MELHORIA NO SISTEMA ATRAVÉS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Após a identificação das etapas do processo de produção de biodiesel de microalgas e quantificação dos fluxos de entradas e saídas de cada etapa, será quantificado os impactos ambientais do processo, sendo apresentados de forma gráfica em uma base percentual, onde para cada etapa ou tecnologia de maior impacto será apresentado como 100% e as demais relativizadas a este. A caracterização será realizada com base nas categorias dos métodos selecionados CML 2000 e Eco-Indicator 99, para este último o impacto das etapas será expresso em potencial de ocupação de solo (Uso do Solo).

Para o método CML 2000, os impactos serão caracterizados em dez categorias, sendo elas: Potencial de Aquecimento Global (PAG), Acidificação (AC), Eutrofização (EU), Depleção abiótica (DA), Depleção da camada de ozônio (DCO), Toxicidade humana (TH), Ecotoxicidade de recursos de água doce (EAD), Ecotoxicidade de recursos de água marinha (EAM), Ecotoxicidade terrestre (ET) e Oxidação fotoquímica (OF).

Após quantificação dos impactos ambientais e caracterização dos mesmos expressos nas categorias já citadas, serão analisadas com base nos percentuais apresentados qual ou quais etapas mais contribuem para o aumentos dos impactos ambientais, e posteriormente será apresentado alternativas tecnológicas para redução dos mesmos através da análise de sensibilidade com objetivo de apresentar um cenário com menor impacto ambiental para a produção de biodiesel de microalgas. Na análise de sensibilidade serão comparadas as sugestões com o cenário base das etapas, auxiliando na interpretação dos resultados com intuito de tornar o biodiesel de microalgas competitivo ambientalmente com outros biodieseis como o de soja, palma e canola.

4.4 IDENTIFICAÇÃO E COMPARAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE MICROALGAS DO NPDEAS COM OS BODIESEIS A BASE DE SOJA, PALMA E CANOLA

Após a identificação da configuração mais indicada para o processo de produção do biodiesel de microalgas, os resultados serão comparados com os resultados de ACV de outros combustíveis para ter uma melhor percepção das vantagens e inconvenientes do biodiesel de microalgas. Essas comparações foram baseadas em trabalhos publicados (JUNGBLUTH et al., 2007; HISCHIER et al., 2007) e incluídos no banco de dados *Ecoinvent*, sendo eles:

biodiesel de soja, palma e canola.

O biodiesel de canola refere-se à produção na Europa (Suíça), a análise do biodiesel de palma refere-se à produção da Malásia, e análise do biocombustível de soja refere-se ao contexto do Brasil. Assim, consistente com o restante do trabalho, pois os dados desse trabalho foram extraídos na base de dados do Ecoinvent v 2.2 (ECOINVENT, 2010) de acordo com condições europeias, devido à escassez de dados brasileiros nas bases de dados do *Ecoinvent* para produção de biodiesel de microalgas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme supracitado, este trabalho avaliou o ciclo de vida de um processo que ainda não está disponível comercialmente em escala piloto ou industrial, e muitos problemas tecnológicos ainda estão sem solução. Além disso, quando existem soluções tecnológicas relevantes, estas ainda precisam ser revistas durante a fase de otimização do processo.

5.1 ACV COMPARATIVA DAS ETAPAS DA PRODUÇÃO DO BIODIESEL NO NPDEAS

5.1.1 Montagem dos sistemas de cultivo - lagoa aberta *versus* fotobiorreator compacto

A ACV foi realizada após as coletas dos parâmetros de entrada e saída diretamente no NPDEAS, como descritos no capítulo 4. A FIGURA 5.1 apresenta os resultados dos sistemas de cultivo nas categorias de impacto do Método CML 2000 (GUINEE et al., 2001, GUINEE et al., 2002). Os resultados demonstram a porcentagem de cada sistema de cultivo nas categorias de impacto em uma escala de 0 a 100%. O procedimento de caracterização dos impactos dentro as categorias considera o cenário com o maior valor de impacto como o equivalente a 100% dos impactos para cada categoria, e os demais cenários relativizados a esse dado.

Na TABELA 5.1, apresenta a quantificação das emissões relacionadas aos dois sistemas de cultivos. É importante observar que a análise com o software *SimaPro 7.3* foi realizada com dados de entrada medidos, estimados e recolhidos diretamente de uma planta existente. Desta forma, é razoável afirmar que os dados de entrada são completos e precisos.

Na FIGURA 5.1, observa-se que o processo de montagem do fotobiorreator tubular (FBR) apresentou menor impacto em duas das categorias sendo elas: depleção da camada de ozônio (DCO) em 42,53% e acidificação (AC) 7,18% quando comparado com a lagoa aberta.

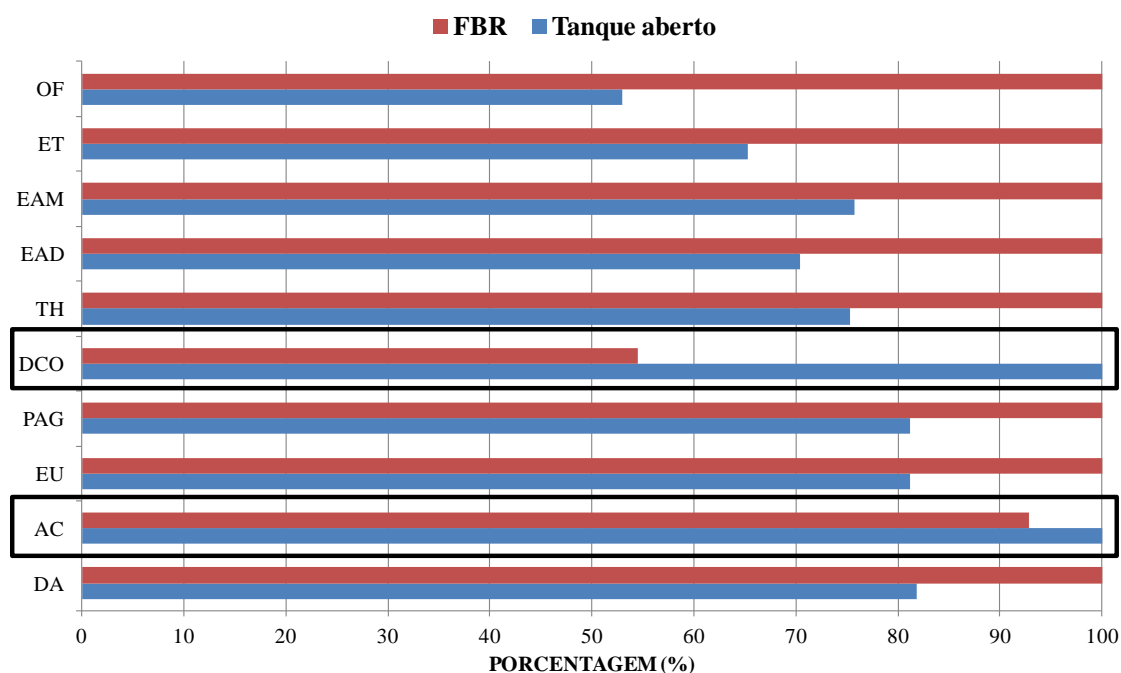


FIGURA 5.1. Análise comparativa da etapa de montagem do FBR e da lagoa aberta.

Na TABELA 5.1 também é possível observar que a montagem do FBR apresentou maiores emissões para a atmosfera em oito das categorias comparado com a lagoa aberta, no entanto, essas emissões para a montagem do FBR são diluídas quando se considera que os materiais para a montagem do FBR após sua desmontagem podem ser enviados para reciclagem e serem incorporados em outro sistema de produção. Para essa análise foi considerado que a vida útil estimada para o FBR foi de 20 anos e o sistema de lagoa aberta considerado neste trabalho (revestido com lonas de PVC) deverá ser substituída em um prazo de 10 anos, devido a estarem dispostos a intempéries do clima.

TABELA 5.1 – Quantificação das emissões pelo Método CML 2000 para a montagem dos sistemas de cultivo.

Categoria de impacto	Unidade	Tanque aberto	FBR Tubular
Depleção Abiótica (DA)	kg Sb eq	9,79E+01	1,20E+02
Acidificação (AC)	kg SO ₂ eq	6,35E+01	5,89E+01
Eutrofização (EU)	kg PO ₄ eq	5,75E+00	7,08E+00
Potencial de Aquecimento Global (PAG)	kg CO ₂ eq	1,23E+04	1,51E+04
Depleção da Camada de Ozônio (DCO)	kg CFC-11 eq	8,59E-04	4,68E-04
Toxicidade Humana (TH)	kg 1,4-DB eq	3,17E+04	4,21E+04
Ecotoxicidade de Água Doce (EAD)	kg 1,4-DB eq	1,20E+03	1,70E+03
Ecotoxicidade de Água Marinha (EAM)	kg 1,4-DB eq	2,44E+05	3,22E+05
Ecotoxicidade Terrestre (TH)	kg 1,4-DB eq	1,19E+02	1,83E+02
Oxidação Fotoquímica (OF)	kg C ₂ H ₄	2,98E+00	5,62E+00

Na FIGURA 5.2 apresenta-se a contribuição dos potenciais impactos da montagem do FBR, e pode-se identificar que os tubos de PVC, o aço e o cimento são as entradas que contribuem majoritariamente na maioria das categorias de impacto do método CML, principalmente para ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade de água doce e para o potencial de aquecimento global.

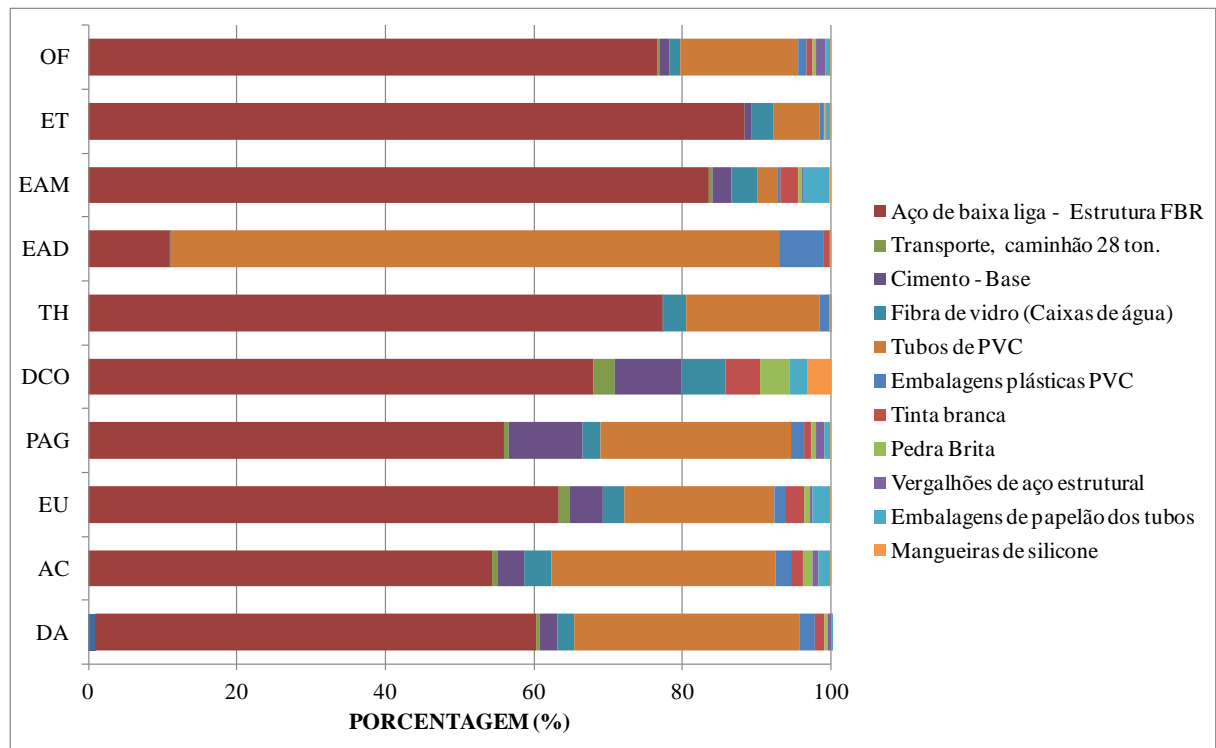


FIGURA 5.2. Contribuição dos impactos ambientais na etapa de montagem do FBR através do método CML 2000.

Segundo Isaia (2005) os impactos dessas três entradas para a montagem do FBR estão diretamente relacionados ao processo industrial para obtenção dos mesmos, devido à emissão de CO₂, material particulado e gases. Nas FIGURAS 5.3, 5.4 e 5.5 pode ser observado às três entradas que mais contribuíram na ACV do FBR e a contribuição destas nas categorias que mais influenciaram as emissões.

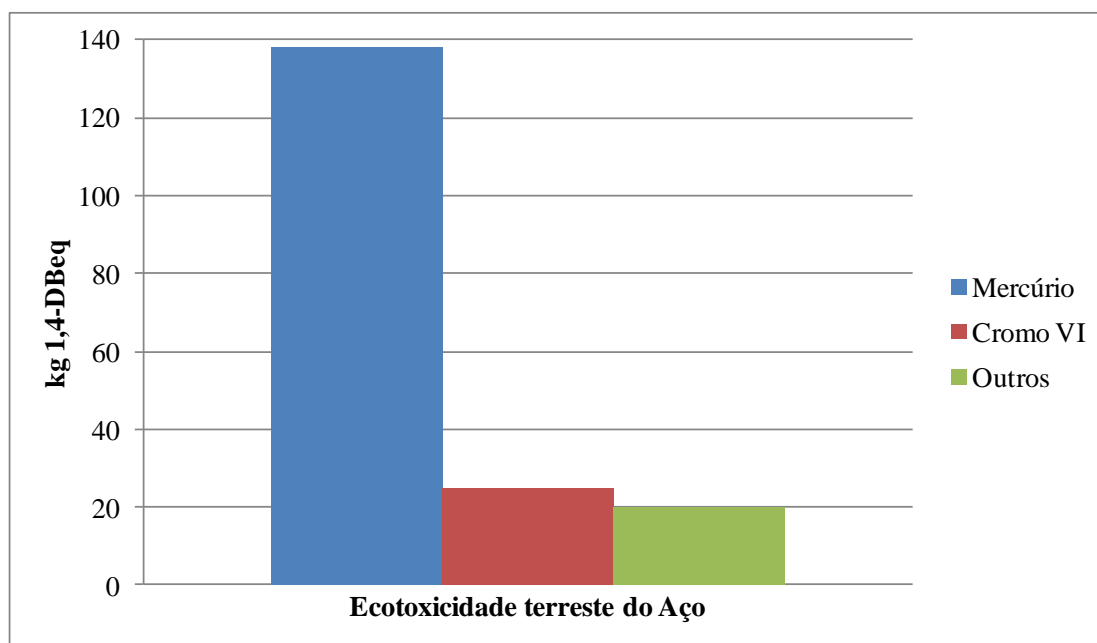


FIGURA 5.3. Contribuição individual do aço para a ecotoxicidade terrestre.

Para o aço, os impactos também estão relacionados ao processo de produção, que pode ser dividido em dois processos principais, o Alto Forno que representa cerca de 60 - 70% da produção mundial de aço e o Forno Elétrico a Arco (FEA), representando o restante (IACOBESCU et al., 2011; ABU-EISHAH et al., 2012). A principal diferença entre estes dois tipos de fornos, são as matérias-primas utilizadas, pois o BOF usa minério de ferro, enquanto a FEA usa sucata de metal (CHUKWUDI et al., 2012), no entanto, o pó do FEA é um dos resíduos críticos e perigosos encontrados nas indústrias de produção de aço, contribuindo para as emissões relacionadas ao aço (OUSTADAKIS et al., 2010).

Além disso, durante os processos de fundição, reaquecimento e de laminagem a quente, são formados óxidos de ferro (UMADEVI et al., 2012), e também, há os impactos provenientes da geração de águas residuais nas indústrias de aço resultante do processo de produção, equipamentos e produtos de refrigeração, gases de combustão bem como instalações para lavagem (MAUTHOOR et al., 2014).

As emissões atmosféricas da produção do aço são compostas de modo geral, por material particulado e gases, estes, contêm dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarbonetos aromáticos e metais pesados, como cromo e mercúrio. A emissão desses gases pode se dar tanto pelas chaminés quanto por emissões fugitivas, o que depende da idade da planta e da tecnologia utilizada (FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE, 2010).

Para o processo de produção do PVC nota-se que a emissão da dioxina é o maior

responsável pelas emissões referentes à ecotoxicidade de água doce, como mostra a FIGURA 5.4. A produção do PVC é uma das maiores fontes mundiais de dioxinas, onde podem ser geradas durante a produção ou queima do PVC por incineração (DARRYL LUSCOMBE, 1999 - Greenpeace).

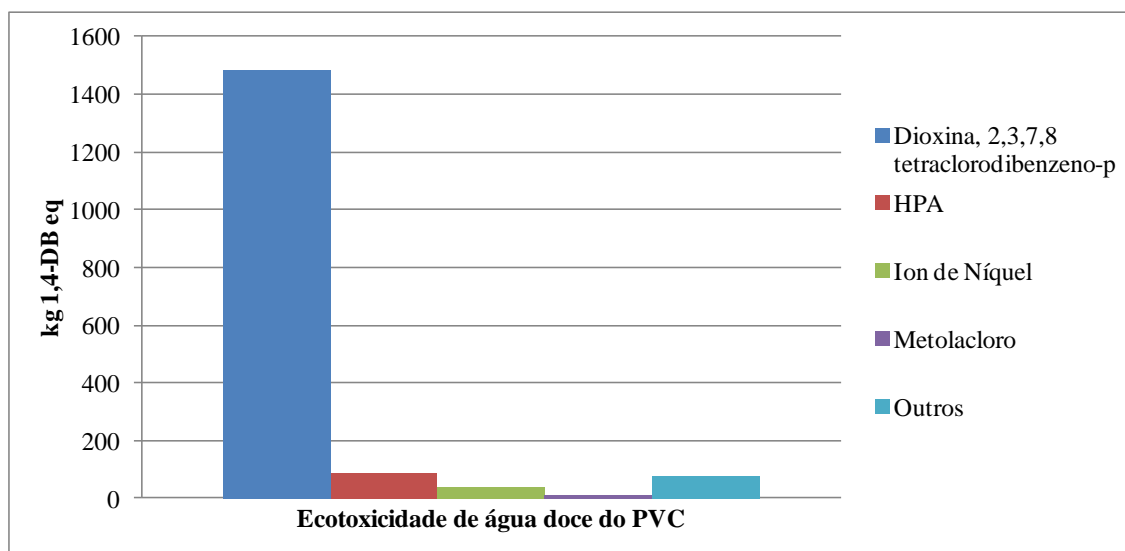


FIGURA 5.4. Contribuição individual do PVC para a ecotoxicidade de água doce.

A produção de dioxina foi identificada em vários processos da produção do PVC, tais como eletrólise de baterias de mercúrio, oxicloração e purificação (Agência Ambiental do Reino Unido, 1997). A associação entre os altos níveis de contaminação por dioxina e a eletrólise nas células de mercúrio foi claramente demonstrada por pesquisa realizada na Suécia (RAPPE et al., 1991).

Outros processos industriais, associados com fabricação de PVC, podem gerar dioxinas, como a incineração de qualquer resíduo organoclorado que levará inevitavelmente à geração da dioxina, através de gases exalados, água para lavagem e resíduos sólidos (RUCHEL et al., 1998).

Outro inconveniente da produção do PVC, mesmo que não se fabricam com materiais 100% originárias do petróleo segundo informações do Instituto do PVC (2010) indicam que seu componente principal corresponde ao cloro, derivado do cloreto de sódio e ao eteno. No entanto, já existe tecnologia para substituir os derivados do petróleo por álcool de origem vegetal como o de cana-de-açúcar (BRASKEM, 2009). No processo conhecido como “*Green route*” (rota verde), ocorre à desidratação do etanol obtido a partir da fermentação e destilação da vinhaça da cana-de-açúcar, conforme informações dadas por Martinz e Quadros (2008). Portanto, uma alternativa para reduzir os impactos do uso do PVC

nos tubos do FBR é propor a utilização de tubos de PVC obtidos pela *Green route* ou o uso de tubos de vidro e avaliar suas emissões comparadas com o PVC. Outra sugestão para reduzir os impactos ambientais na montagem do FBR, é a utilização de tubos de policarbonato, por exemplo, uma vez que este é mais resistente e também é mais leve (consequentemente reduziria a quantidade de aço necessária na estrutura do FBR), um pouco menos tóxico que o PVC, totalmente reciclável e ambientalmente preferível ao PVC, reduzindo os impactos da etapa de montagem do sistema de cultivo.

Na FIGURA 5.5, pode-se observar que para a produção do cimento a emissão de CO₂ é a substância que mais influencia para o aumento das emissões para a categoria de impacto PAG, onde pouco mais da metade da emissão de CO₂ na indústria do cimento é inerente ao processo de produção e ocorre durante a transformação físico-química do calcário em clínquer (principal componente do cimento), reação denominada descarbonatação (CESTESB, 2009).

Segundo Isaia (2005), o processo de produção do cimento contribui com 6 a 7% nas emissões mundiais de CO₂, isso porque para a produção de uma tonelada de clínquer são emitidas aproximadamente a mesma quantidade de CO₂, além de outros gases intensificadores do efeito estufa, como CO, CH₄, NO_x, NO₂ e SO₂, em proporções menores (MEHTA, 2002).

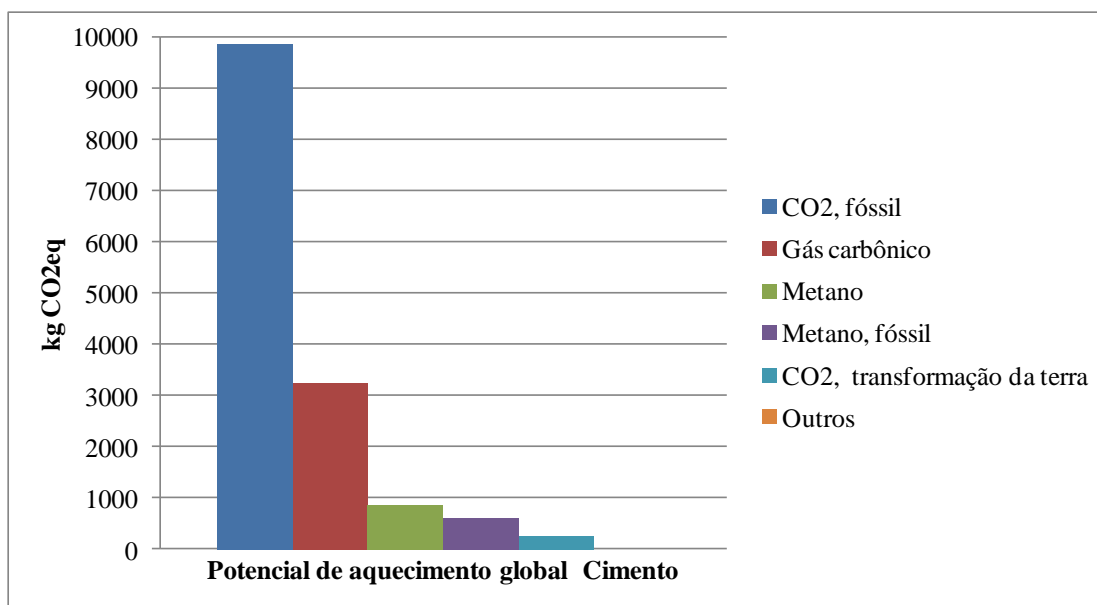


FIGURA 5.5. Contribuição individual do cimento para o potencial de aquecimento global.

Portanto, dentro deste contexto, nos últimos anos têm-se intensificado os estudos visando reduções da produção de clínquer pela indústria cimenteira, ou mesmo substituição parcial do cimento por materiais cimentícios e/ou pozolânicos no concreto, onde a possibilidade de incorporação, pela indústria do concreto, de resíduos agroindustriais merece

destaque no Brasil, principalmente em razão dos grandes montantes gerados anualmente (CORDEIRO, 2006). Neste aspecto, a cinza do bagaço de cana de açúcar, em virtude da presença preponderante de sílica na composição química, apresenta-se como matéria-prima potencial para a produção de cimento, e segundo o mesmo autor os resultados dos cálculos de emissão de dióxido de carbono revelaram que a substituição de 40% de cimento pelas cinzas ultrafinas do bagaço da cana-de-açúcar proporcionaram uma redução de 50% na quantidade total de CO₂ emitido.

Quando utilizado o Método Eco-Indicator 99 para avaliação dos impactos ambientais relacionados à área ocupada pelos sistemas de cultivo, nota-se que o FBR do NPDEAS minimiza consideravelmente o impacto sobre o uso de áreas cultiváveis (FIGURA 5.6), pois cada FBR possui 8 m de altura e são capazes de cultivar 10 m³ de meio de microalgas ocupando apenas 10 m² enquanto a lagoa aberta utiliza 34 m² de área para cultivar o mesmo volume do FBR, além disso, ao observar a TABELA 5.2 nota-se que para o Uso do Solo, a lagoa aberta emite 39,1 PDF*m²yr enquanto o FBR apenas 11,5 PDF*m²yr, confirmando assim, o potencial de uso dos FBRs para cultivo de microalgas em escala industrial.

Portanto, é promissor indicar que as lagoas abertas para produção de biodiesel de microalgas sejam implantadas nos países com extensas terras não cultiváveis ou de baixo custo (por exemplo, países do Norte Africano). Em contraste, nos países em que as terras têm preços altos e são altamente cultiváveis/aráveis (países da União Europeia), os FBRs ou outros sistemas fechados verticais é uma excelente tecnologia para produção do biocombustível alternativo como o caso do biodiesel de microalgas.

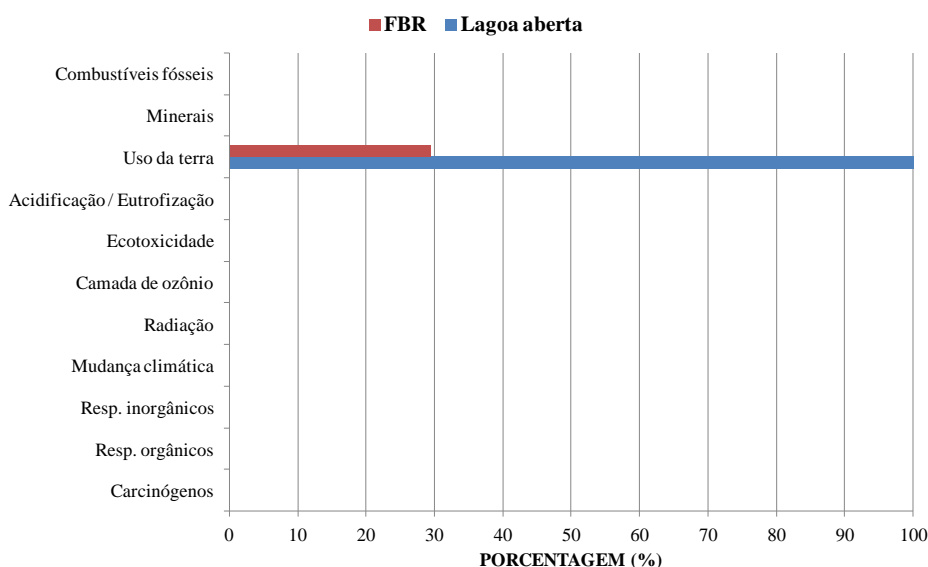


FIGURA 5.6. Contribuição dos impactos ambientais na etapa de montagem do FBR através do método E-I99 para uso da terra.

TABELA 5.2 – Quantificação dos impactos ambientais pelo Método Eco-Indicator 99 para ocupação de área dos sistemas de cultivos.

Categoria de impacto	Unidade	Lagoa aberta	FBR
Carcinógenos	DALY	0	0
Resp. orgânicos	DALY	0	0
Resp. inorgânicos	DALY	0	0
Mudança Climática	DALY	0	0
Radiação	DALY	0	0
Camada de Ozônio	DALY	0	0
Ecotoxicidade	PAF*m ² yr	0	0
Acidificação / Eutrofização	PDF*m ² yr	0	0
Uso da terra	PDF*m ² yr	39,1	11,5
Minerais	MJ surplus	0	0
Combustíveis fósseis	MJ surplus	0	0

Alguns autores também complementam que a utilização de fotobiorreatores minimiza o potencial para contaminação do cultivo por organismos indesejáveis, ou seja, resultando em um aumento da produção (VASUMATHI et al., 2012). Segundo Schenk et al. (2008), o alto custo e impactos associados aos fotobiorreatores são largamente compensados pela maior produtividade de biomassa quando comparados com lagoas abertas, como mostra a FIGURA 5.7, considerando cultivo em lagoas abertas e FBR de microalgas comparadas com a palma – cultura terrestre).

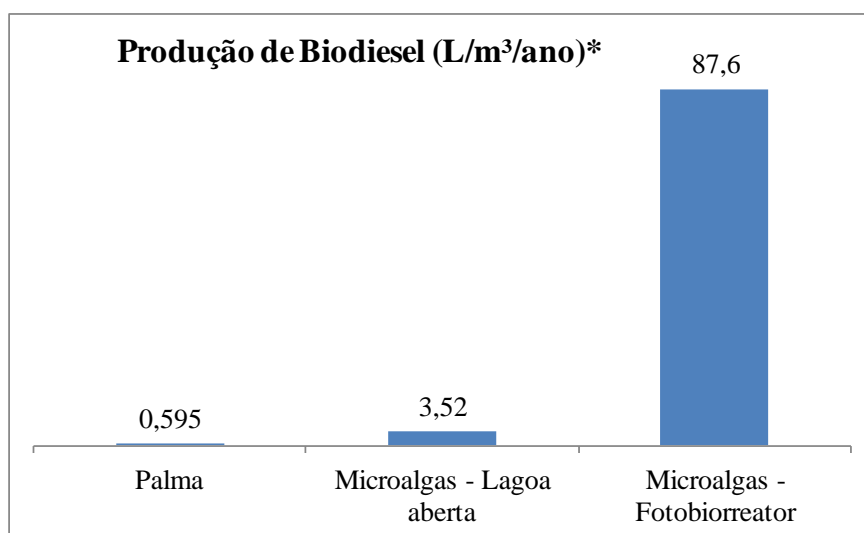


FIGURA 5.7. Projeção da produção de biodiesel de palma e microalgas, estas cultivadas em lagoa aberta e fotobiorreator, considerando 20% óleo (v/v) na biomassa seca. Densidade de biodiesel assumida de 800 kg m⁻³.
Fonte: Modificado de Silva et al. (2013).

Além disso, os fotobiorreatores fornecem condições de cultivo ideais para as microalgas, pois esses equipamentos permitem grande aproveitamento da energia luminosa solar, condição fundamental para a realização da fotossíntese pelas microalgas, e também

devido o FBR ser fechado, existe pouca interação com o meio externo o que reduz o risco de contaminações.

5.1.2 Comparação dos cultivos das microalgas com meio sintético e com meio alternativo

Na FIGURA 5.8 são apresentadas as emissões relacionadas às duas fontes nutricionais para o cultivo de microalgas para obter a unidade funcional de 25 litros de biodiesel. A caracterização dos impactos em todas as categorias considera o cenário com o maior valor de impacto, como o equivalente a 100% dos impactos para cada categoria, e os demais cenários relativizados a esse dado, e a TABELA 5.3 apresenta o quantitativo das emissões de cada cenário em cada categoria de impacto.

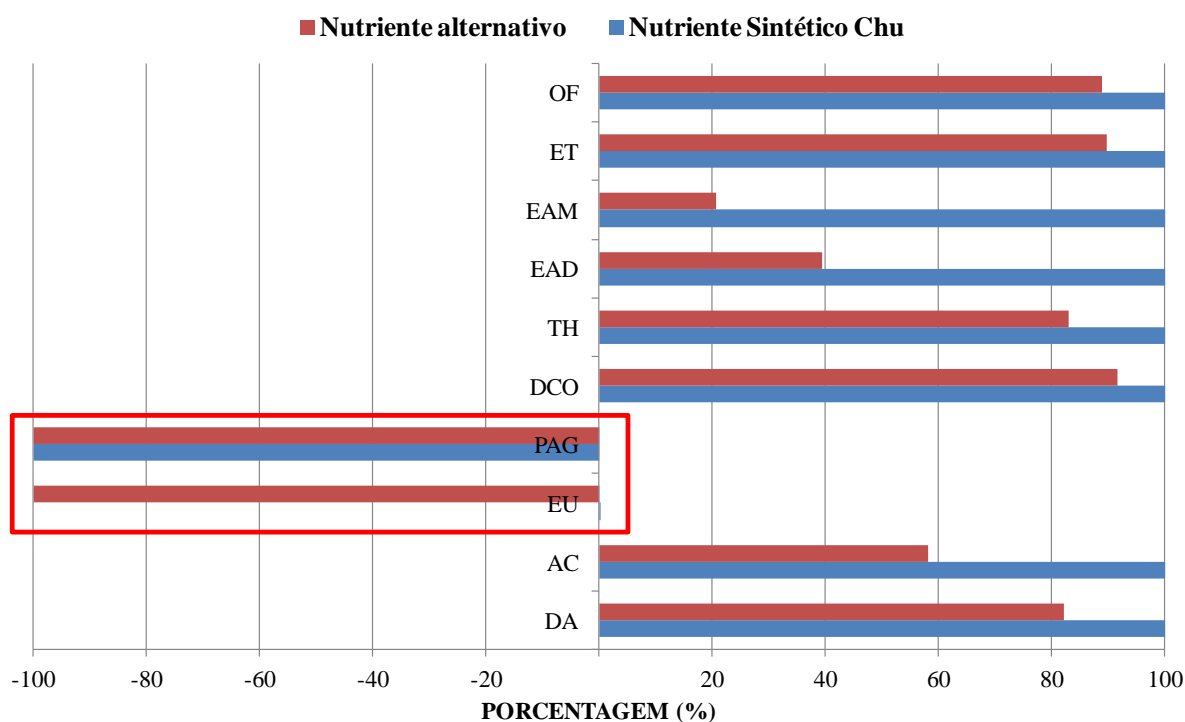


FIGURA 5.8. Avaliação ambiental dos cultivos das microalgas considerando as duas fontes nutricionais.

O cultivo de microalgas com o efluente da suinocultura apresentou resultados favoráveis quando comparado com o cultivo com nutriente sintético em todas as categorias avaliadas, isso devido a não utilização de nutrientes comerciais (sintéticos), que exigem insumos energéticos significativos para a sua produção e transporte, enquanto águas residuais contêm os mesmos nutrientes sem custo e impacto algum. A substituição de efluente da suinocultura aos nutrientes sintéticos reduziu as emissões em todas as categorias analisadas, dando destaque para ecotoxicidade de água doce (EAD) em 60,41 %,

ecotoxicidade de água marinha (EAM) em 79,45 %, e para potencial de aquecimento global (PAG) e eutrofização (EU) o cultivo com efluente da suinocultura gerou um crédito deixando de emitir $1,24\text{E}+11 \text{ KgCO}_{2\text{eq}}$ e $7,03\text{E}+04 \text{ KgPO}_{4\text{eq}}$, comprovando que as microalgas são seres importantes para a biomitigação dos gases de efeito estufa, além disso, o uso de efluentes da suinocultura minimizou as demandas globais de água no cultivo, uma vez que os efluentes incorporados são líquidos.

TABELA 5.3 – Quantificação das emissões pelo Método CML 2000 para a etapa de cultivo das microalgas.

Categoria de impacto	Unidade	Tanque aberto	FBR Tubular
Depleção Abiótica (DA)	kg Sb eq	2,32E+01	1,91E+01
Acidificação (AC)	kg SO ₂ eq	1,07E+01	6,24E+00
Eutrofização (EU)	kg PO ₄ eq	2,94E+00	-7,03E+04
Potencial de Aquecimento Global (PAG)	kg CO ₂ eq	-1,24E+11	-1,24E+11
Depleção da Camada de Ozônio (DCO)	kg CFC-11 eq	2,93E-04	2,69E-04
Toxicidade Humana (TH)	kg 1,4-DB eq	7,47E+02	6,19E+02
Ecotoxicidade de Água Doce (EAD)	kg 1,4-DB eq	7,30E+01	2,89E+01
Ecotoxicidade de Água Marinha (EAM)	kg 1,4-DB eq	1,46E+05	3,00E+04
Ecotoxicidade Terrestre (TH)	kg 1,4-DB eq	1,33E+01	1,20E+01
Oxidação Fotoquímica (OF)	kg C ₂ H ₄	1,80E+00	1,60E+00

O potencial de aquecimento global é um impacto proveniente da emissão dos gases do efeito estufa, e no ciclo de vida do biodiesel ele está associado, principalmente, a queima de combustível (de todas as formas) e a consequente emissão de dióxido de carbono na atmosfera. Porém, o cultivo de microalgas absorve o carbono atmosférico, pela injeção de CO₂ proveniente da atmosfera usando compressores de ar. Portanto, nota-se que devido a isso a produção de biodiesel de microalgal oferece um crédito para os dois cenários nutricionais, devido à captação de CO₂ atmosférico utilizado para a realização da fotossíntese e posterior produção de biomassa, reduzindo assim o potencial de aquecimento global.

Além da captação do CO₂ atmosférico, alguns autores (STEPHENSON et al., 2010) afirmam que o CO₂ concentrado, proveniente dos gases de exaustão de centrais elétricas ou de fábricas também podem ser utilizados como fonte de carbono para aumentar a taxa de crescimento da biomassa microalgal, e consequentemente reduzir a pegada de carbono da produção de biodiesel a partir de microalgas (SUDHAKAR et al., 2012), e segundo Stephenson et al. (2010) as porcentagens de CO₂ nos gases de combustão variam de 5 à 15% (BRENTNER et al., 2011), taxas essas, maiores do que as de CO₂ disponível na atmosfera 0,036% (GRIS, 2011). Outros estudos indicam o cultivo de microalgas como uma alternativa importante na biomitigação de CO₂ (AMIN, 2009; IPCC, 2007).

O impacto relativo ao potencial de eutrofização associado ao cultivo com o meio Chu está diretamente relacionado ao potencial de escoamento do fosfato para os corpos hídricos, devido os meios de cultivos com nutrientes sintéticos normalmente serem elaborados com concentrações saturantes de modo que a concentração de nutriente não seja o fator limitante do cultivo das microalgas, e consequente à disponibilidade para ser carregado em alguma eventual precipitação, estão entre os motivos principais deste impacto. Além dos impactos relacionados ao aumento da acidificação, comprometendo assim o desenvolvimento de seres vivos (fauna e flora) na região (RECIPE, 2008), se dá devido à liberação na água e solo de algumas substâncias como: sulfato, nitrato, fosfato, NO_x e SO_4 , estes originados do meio nutricional sintético.

Além disso, no cenário de cultivo de microalgas com nutriente alternativo, nota-se uma redução do potencial de eutrofização, deixando de emitir $7,03\text{E}04 \text{ kgPO}_{4\text{eq}}$ para o meio ambiente. Isso porque a aplicação desses elementos como meio de cultivo para as microalgas substitui a utilização de nutrientes sintéticos no processo e resultam na redução dos impactos ambientais, no que se refere à diminuição da necessidade de tratamento e disposição final desses efluentes, uma vez que os resíduos animais são uma fonte crescente de GEE, incluindo o metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), e que segundo a Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA) estima que no período de 1990 a 2009 as emissões de GEE de resíduos animais aumentaram em quase 60% (EPA, 2010). Dessa maneira, a utilização de resíduos de origem agrícola, pecuária ou industrial apresenta-se como uma alternativa viável para minimizar tais impactos.

Outro ponto importante a ser considerado, é que as microalgas além de produzir biomassa com a utilização de resíduos agropecuários para seu crescimento, elas também são considerados biorremediadores, uma vez que o efluente ao ser consumido no cultivo é tratado, onde suas cargas orgânicas podem ser reduzidas até 90% para nitrogênio total, amônia 100%, potássio 62% para efluentes da bovinocultura (OLIVEIRA, 2013), e para efluentes da suinocultura, 97% para nitrogênio total, 99% para fosfatos, nitrogênio amoniacal 99,6% (TAHER, 2013), o que confirma a utilização de microalgas para a produção de subprodutos como o biodiesel e também como potencial biorremediadoras de águas residuais.

Esses resultados confirmaram o que foi encontrado no estudo de Sander e Murthy (2010) onde é assumido que as necessidades de nutrientes e de água no cultivo de biomassa microalgal podem ser satisfeitas através do uso de efluentes da agroindústria, como nesse trabalho o da suinocultura. E de acordo com Yang et al. (2011) a utilização de águas residuais como meio de cultura pode reduzir significativamente a pegada de água, e além disso reduzir

a necessidade de N em 94% e eliminar a necessidade de K, magnésio (Mg) e enxofre (S) (CHOWDHURY et al., 2012).

Portanto, o uso de microalgas como biodiesel trata-se de uma cultura em desenvolvimento, e encontra-se em constantes mudanças tecnológicas. Apesar disto, as microalgas apresentam a vantagem para a produção de biodiesel, pois não competem com culturas alimentares, como o caso da produção de biodiesel a partir de oleaginosas terrestres, como soja, canola etc.

5.1.3 Análises dos cenários de recuperação da biomassa de microalgas no NPDEAS

5.1.3.1 Determinação do melhor agente floculante

Como mostra a TABELA 5.4, para esta etapa foram selecionados quatro agentes floculantes para avaliar sua eficiência de floculação e ambiental, sendo eles: FeCl_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e NaOH. São apresentadas as concentrações e sua eficiência de floculação a seguir.

TABELA 5.4 - Comparativo das eficiências dos agentes floculantes testados.

Floculante	Referência	Concentração (mg/L)	Eficiência da floculação (%)
FeCl_3	Lu Chen et al., 2013**	150	96,0±0,8
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	Lu Chen et al., 2013**	300	96,5±1,1
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Lu Chen et al., 2013**	400	20,8±3,0
NaOH	Lemos, 2013**	144	93,5±0,02

Nota: ** Melhores condições encontradas na literatura e reproduzidas no NPDEAS.

Fonte: Modificado de Selesu et al. (2014).

Nota-se que o $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ e FeCl_3 exibiram uma elevada eficiência de floculação sendo maior que de 95% sendo altamente eficazes para etapa de floculação dessa espécie de microalgas, seguidos do hidróxido de sódio com 93,5%. E o hidróxido de cálcio mostrou resultados de eficiência de coagulação (20,8%) suficientes para que não seja indicado para a sedimentação de microalgas da espécie *Scenedesmus* sp..

Porém, ao se utilizar o FeCl_3 verificou-se a imediata mudança de coloração da biomassa após adição do sal para um tom forte de laranja, o qual pode ser associado à presença do ferro. Segundo alguns autores essa descoloração celular pode comprometer o uso da biomassa de acordo com a sua finalidade, por exemplo, para pigmentos devido a presença do ferro no sal (PAPAZI et al., 2010; MORCELLI, 2011). Além disso, Kwon et al. (2014) destacam que o cloreto férrico é corrosivo e que o sulfato de alumínio está associado a

ocorrência de doença de Alzheimer, ficando restrita a aplicação da biomassa recuperada através deste processo para fins nutricionais, por exemplo, portanto, para esse trabalho foi descartado o uso destes agentes floculantes para recuperação da biomassa.

Além da eficiência de floculação dos quatro agentes floculantes mostrados na TABELA 5.4, foram analisadas a eficiência ambiental dos mesmos apresentados na FIGURA 5.9. As emissões relacionadas ao ciclo de vida dos agentes floculantes foram comparadas a fim de estabelecer o agente floculante com menor impacto para o meio ambiente, para assim ser considerado na avaliação dos cenários propostos para a recuperação da biomassa microalgal, como descritos na metodologia.

Assim, como o FeCl_3 apresentou uma elevada eficiência de floculação, na FIGURA 5.9 e TABELA 5.5 nota-se que o mesmo apresentou o menor potencial de impacto ambiental nas quatro categorias considerados, seguido do hidróxido de sódio, quando comparados com os demais agentes coagulantes.

Desta forma, para as análises dos cenários de recuperação considerados, foi considerado o hidróxido de sódio como agente floculante padrão dessas análises, uma vez que se mostrou um bom agente floculante, promovendo coagulação com valores tão eficientes quanto 93,5% para a concentração ideal de 144 mg por litro de suspensão, e com o melhor perfil ambiental entre os agentes floculantes que não causaram alterações visíveis de cor na biomassa e não comprometem seu uso.

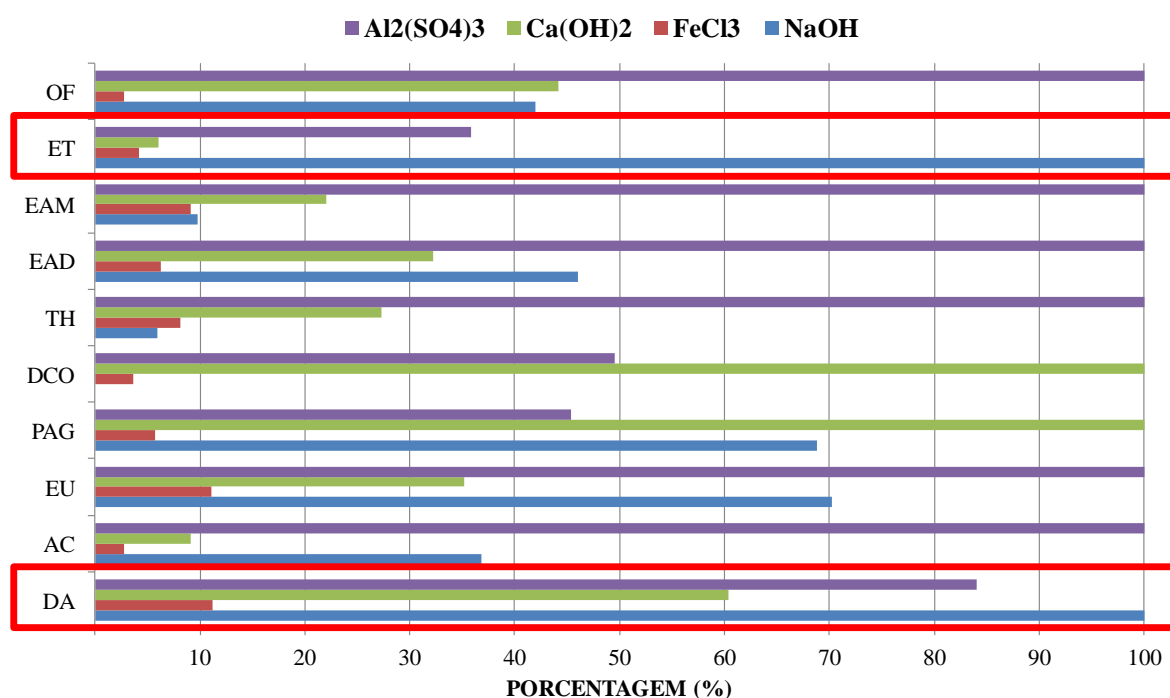


FIGURA 5.9. Perfil ambiental dos agentes floculantes considerados no trabalho.

Portanto, para o processo de floculação neste trabalho foi assumido como agente floculante o hidróxido de sódio. E conforme Lee et al. (2009) a floculação é um processo viável para recuperação da biomassa, porém, depende das características químicas dos agentes floculantes, pois estes podem danificar as células, levando a perdas de substâncias celulares de interesse, e dependendo do tipo de uso ao qual a biomassa recuperada será destinada, como, por exemplo, extração de metabólitos de alto valor ou alimento, o ideal é empregar coagulantes que não sejam tóxicos.

Porém, mesmo o hidróxido de sódio apresentando o melhor perfil ambiental para a floculação com uso de agentes floculantes, a auto floculação das microalgas evitaria a entrada de agentes floculantes, o que poderia melhorar significativamente os impactos ambientais desse processo, uma vez que o uso do NaOH é mais impactante para as categorias depleção abiótica e ecotoxicidade terrestre comparado com outros floculantes avaliados.

TABELA 5.5 – Quantificação das emissões pelo Método CML 2000 para a etapa de recuperação da biomassa através de agentes floculantes.

Categoria de impacto	Unidade	NaOH	FeCl₃	Ca(OH)₂	Al₂(SO₄)₃
Depleção Abiótica (DA)	kg Sb eq	5,76E-01	6,42E-02	3,48E-01	4,84E-01
Acidificação (AC)	kg SO ₂ eq	5,47E-01	4,07E-02	1,36E-01	1,48E+00
Eutrofização (EU)	kg PO ₄ eq	3,01E-02	4,77E-03	1,51E-02	4,28E-02
Potencial de Aquecimento Global (PAG)	kg CO ₂ eq	1,04E+02	8,70E+00	1,52E+02	6,90E+01
Depleção da Camada de Ozônio (DCO)	kg CFC-11 eq	0,00E+00	3,80E-07	1,05E-05	5,20E-06
Toxicidade Humana (TH)	kg 1,4-DB eq	7,00E-01	9,53E-01	3,19E+00	1,17E+01
Ecotoxicidade de Água Doce (EAD)	kg 1,4-DB eq	4,21E-01	5,78E-02	2,96E-01	9,16E-01
Ecotoxicidade de Água Marinha (EAM)	kg 1,4-DB eq	3,44E+02	3,21E+02	7,79E+02	3,53E+03
Ecotoxicidade Terrestre (TH)	kg 1,4-DB eq	3,75E-01	1,58E-02	2,27E-02	1,34E-01
Oxidação Fotoquímica (OF)	kg C ₂ H ₄	2,44E-02	1,60E-03	2,57E-02	5,82E-02

Nas FIGURAS 5.10 e 5.11 é apresentado a contribuição individual por substâncias na produção do NaOH para as categorias depleção abiótica (DA) e ecotoxicidade terrestre (ET), e pode-se notar que o uso de energia a partir de gás natural e emissão de mercúrio (Hg) durante o processo de produção do hidróxido de sódio são responsáveis por esse aumento no impacto ambiental dessas categorias.

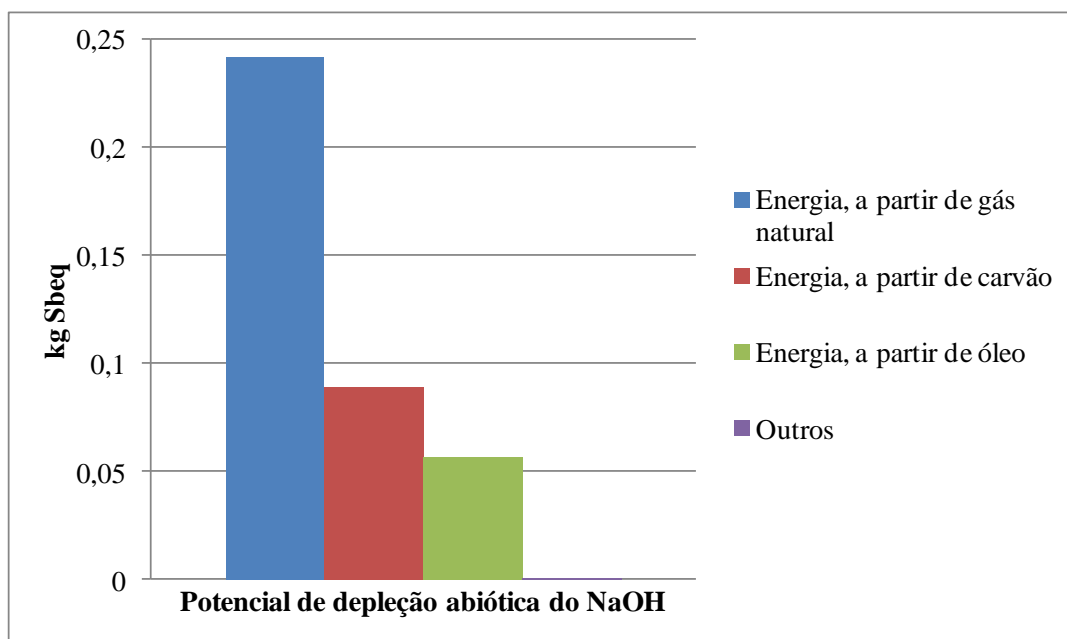


FIGURA 5.10. Contribuição individual do NaOH para o potencial de depleção abiótica.

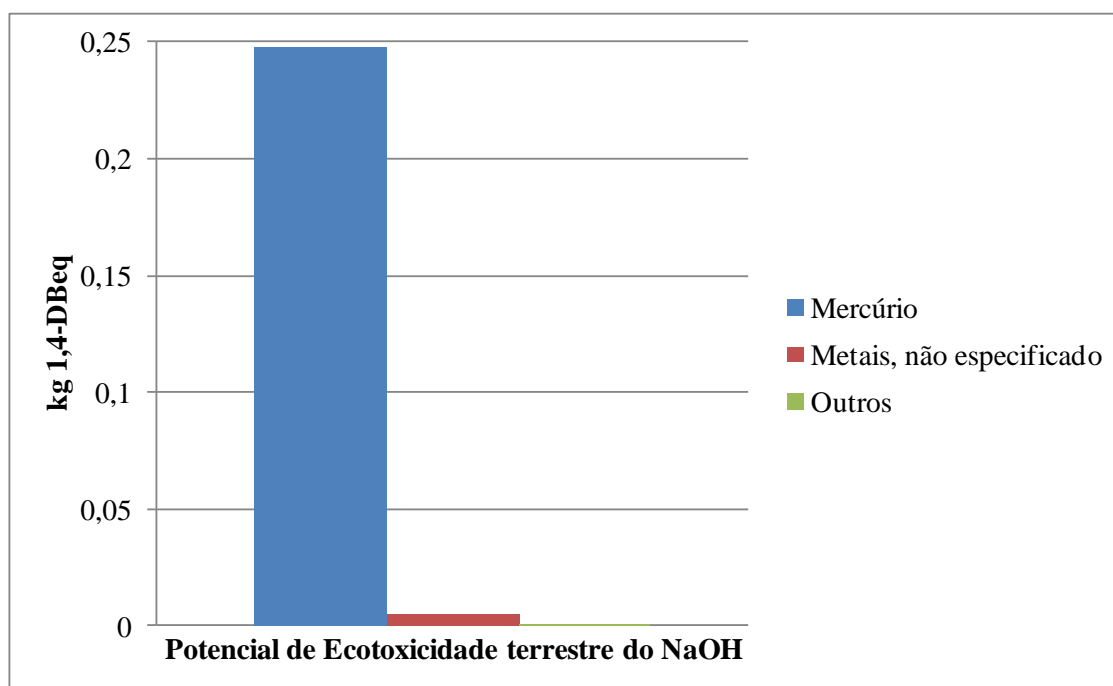


FIGURA 5.11. Contribuição individual do NaOH para o potencial de ecotoxicidade terrestre.

Segundo Fausto (2003) no processo de produção do NaOH, para cada tonelada produzida ocorre uma perda de 450g de Hg para a atmosfera, e segundo Lacerda et al (2006) as indústrias de cloro-álcali brasileiras contribuem com 17 toneladas por ano das emissões de mercúrio para a atmosfera no Brasil. Entretanto, para que a etapa de floculação emita menos poluentes como o mercúrio e menor uso de energia, devem-se buscar processos de produção de NaOH que visem à produção limpa, assim podendo contribuir para a produção do biodiesel

de forma sustentável ambientalmente. Portanto, os resultados mostram que é importante considerar tanto os aspectos de eficiência da floculação, quanto impactos ambientais para identificar os melhores coagulantes em escala piloto.

5.1.3.2 Análise ambiental das tecnologias consideradas para a recuperação da biomassa

Na FIGURA 5.12, apresenta-se as emissões das tecnologias consideradas para a recuperação da biomassa microalgal. Nota-se que a floculação é a tecnologia com menor impacto ambiental comparado com as outras tecnologias avaliadas.

A utilização da filtragem simples para recuperação da biomassa, apesar de não apresentar alto impacto ambiental conforme apresentado na TABELA 5.6, requer um demasiado tempo para obter a unidade funcional definida no trabalho, pois microalgas com diâmetros menores que 70 μm necessitam de membranas com poros pequenos e consequentemente de alta pressão para que ocorra o fluxo dela, inviabilizando a técnica para processos em escala industrial, e segundo Brennan (2010) somente para baixas vazões (menores que $2\text{m}^3.\text{dia}^{-1}$) a filtragem é vantajosa frente a centrifugação.

Para a centrifugação e a secagem térmica da biomassa, a maior parte dos impactos ambientais está relacionada ao alto consumo energético. Para cultivos com concentrações de biomassa relativamente baixas, a utilização da centrifugação para recuperação da biomassa além do alto gasto energético, o processamento de grandes quantidades de cultura consumiria uma grande quantidade de tempo.

Considerando a tecnologia de floculação, o uso do agente floculante é o maior responsável pelos impactos gerados nas categorias de impacto, como mostrado na FIGURA 5.13. Para esse trabalho considerando a unidade funcional definida a melhor opção tecnológica de recuperação da biomassa foi a floculação, assim como no estudo de Danquah et al. (2008) para produção de biocombustíveis. Essa técnica foi testada com sucesso também na aquicultura (KNUCKEY et al., 2006) e no tratamento de águas residuais (GODOS et al., 2011).

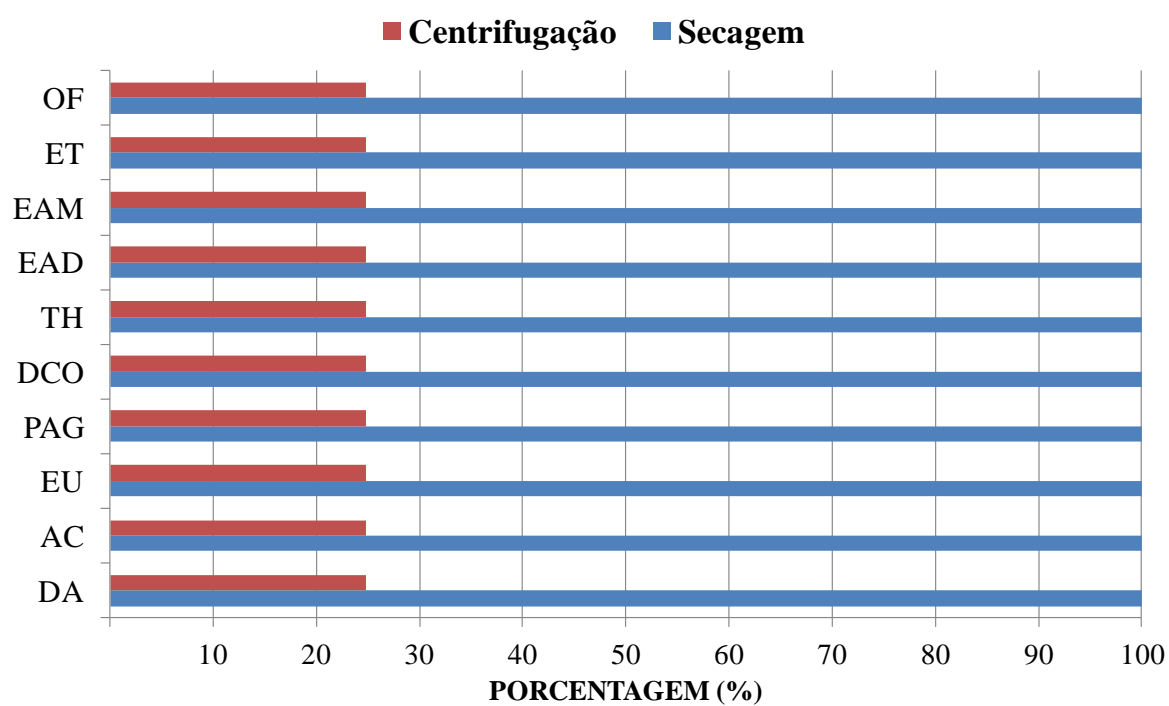
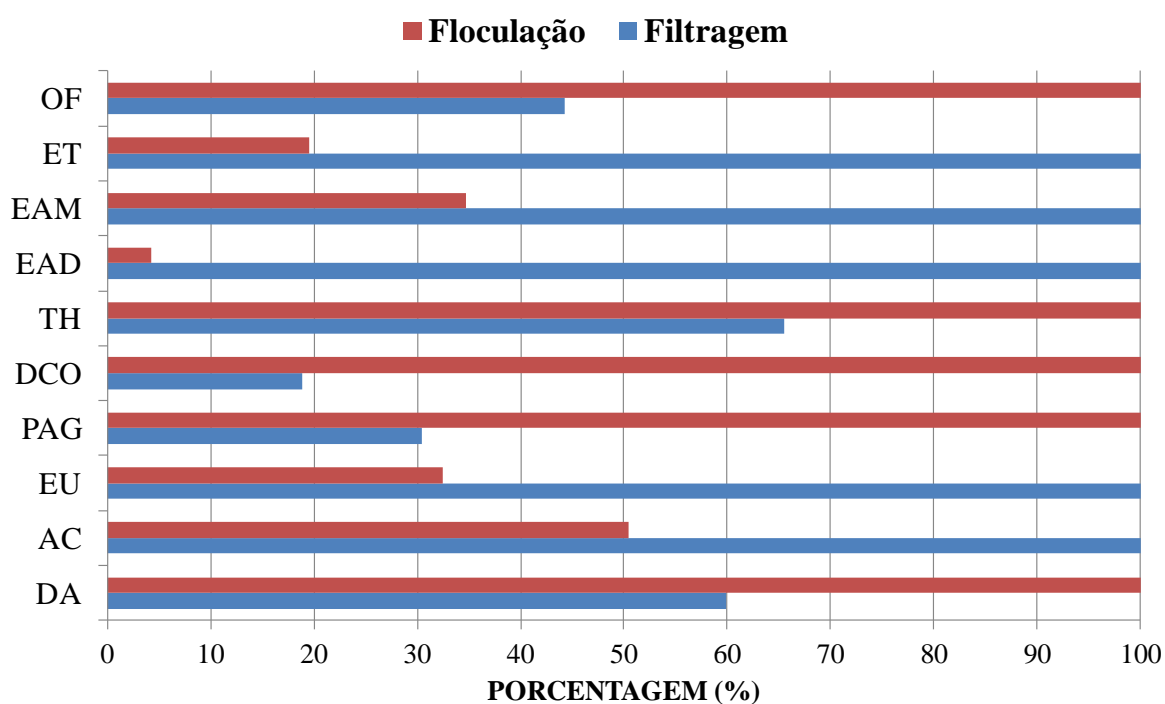


FIGURA 5.12. Impactos ambientais das tecnologias de recuperação da biomassa utilizadas no NPDEAS.

TABELA 5.6 – Quantificação das emissões pelo Método CML 2000 para a etapa de recuperação da biomassa considerando as tecnologias testadas no NPDEAS.

Categoria de impacto	Unidade	Secagem	Centrifugação	Floculação	Filtragem
Depleção Abiótica (DA)	kg Sb eq	7,10E+00	1,76E+00	2,15E-04	1,29E-04
Acidificação (AC)	kg SO ₂ eq	2,33E+00	5,78E-01	1,05E-04	2,08E-04
Eutrofização (EU)	kg PO ₄ eq	2,93E-01	7,28E-02	9,50E-06	2,92E-05
Potencial de Aquecimento Global (PAG)	kg CO ₂ eq	2,72E+03	6,77E+02	7,15E-02	2,18E-02
Depleção da Camada de Ozônio (DCO)	kg CFC-11 eq	1,00E-04	2,49E-05	2,26E-09	4,26E-10
Toxicidade Humana (TH)	kg 1,4-DB eq	2,31E+02	5,73E+01	5,27E-03	3,45E-03
Ecotoxicidade de Água Doce (EAD)	kg 1,4-DB eq	1,08E+01	2,67E+00	2,83E-04	6,76E-03
Ecotoxicidade de Água Marinha (EAM)	kg 1,4-DB eq	1,12E+04	2,78E+03	2,85E-01	8,21E-01
Ecotoxicidade Terrestre (TH)	kg 1,4-DB eq	4,46E+00	1,11E+00	1,37E-04	7,01E-04
Oxidação Fotoquímica (OF)	kg C ₂ H ₄	5,96E-01	1,48E-01	1,58E-05	7,00E-06

Na FIGURA 5.13 observa-se também que a produção e distribuição de energia elétrica são os processos responsáveis pela maioria dos impactos relacionados em todas as categorias de impacto para as tecnologias de recuperação da biomassa testadas no NPDEAS. E segundo Dones et al. (2007) para os impactos relacionados ao uso de energia elétrica, deve-se ao fato que existe uma parcela da eletricidade brasileira é proveniente de termoelétricas a partir de combustíveis fósseis e por usinas nucleares. Portanto, o consumo de energia está associado ao aquecimento global devido a grandes quantidades de emissões de gases, tais como monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, entre outros. Além disso, a transformação da terra e a inundação de vegetação durante a construção e operação do reservatório são responsáveis pela liberação de elevadas quantidades de CO₂ e metano que contribuem para as mudanças climáticas.

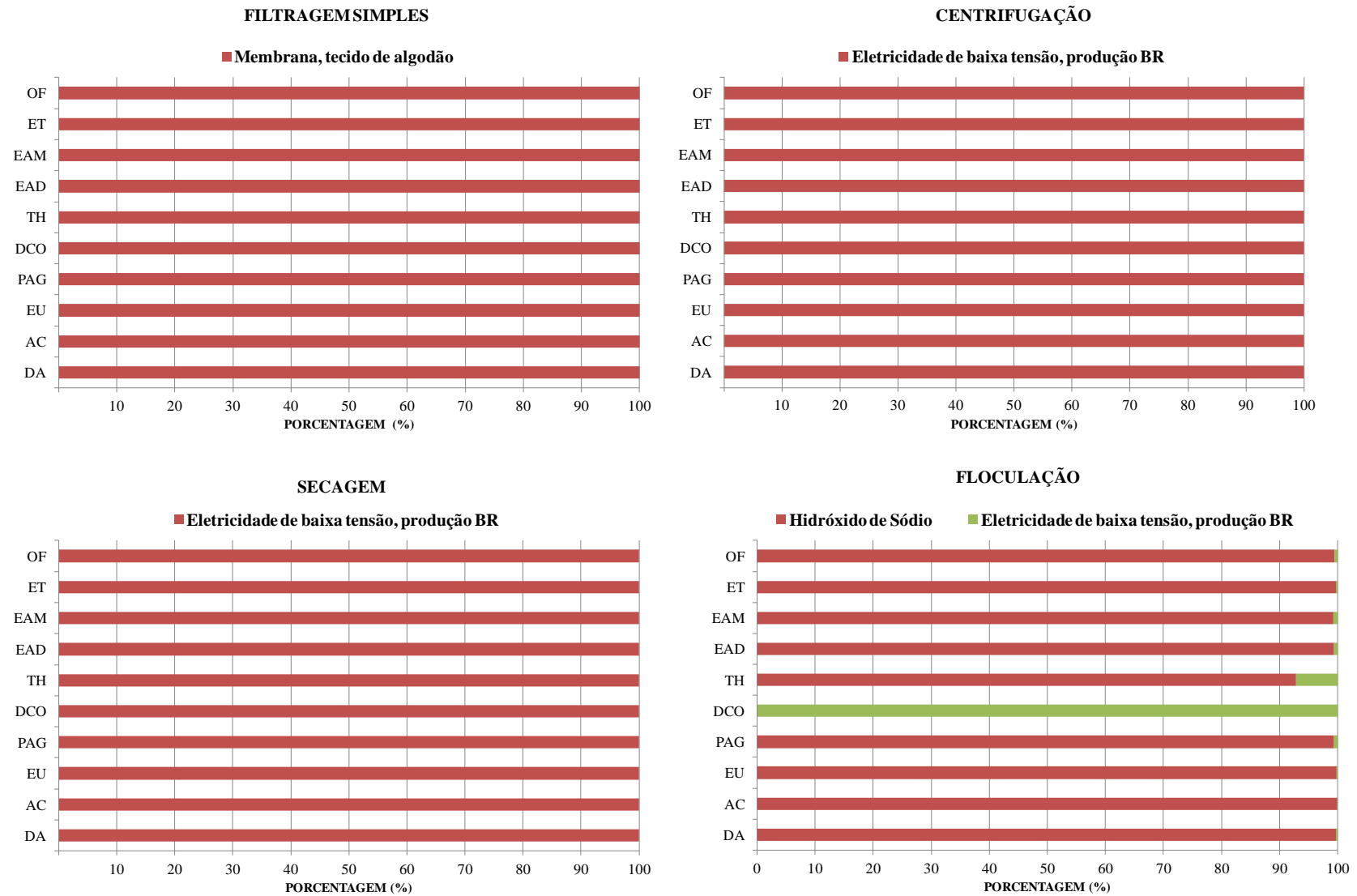


FIGURA 5.13. Avaliação individual de cada tecnologia utilizada no NPDEAS para a recuperação da biomassa microagal.

5.1.3.3 Análise dos cenários considerados para a recuperação da biomassa

Considerando as tecnologias disponíveis para recuperação da biomassa utilizadas no NPDEAS, acoplou-se essas em 3 cenários para melhorar a recuperação da biomassa microalgal, eficiência energética e ambiental. Como pode ser observado na FIGURA 5.14, o cenário 1, se mostrou com o melhor perfil ambiental com menores emissões ambientais em praticamente todas as categorias, seguido do cenário 3. No entanto, esses dois cenários resultam em diferentes produtos finais, o cenário 3, após a recuperação da biomassa do cultivo, obtém-se uma pasta úmida de microalgas, podendo ser utilizada na extração do óleo através da saponificação, e o cenário 1, obtém-se a biomassa seca, podendo ser utilizado na extração do óleo através da metodologia de *Bligh e Dyer* em escala laboratorial ou extração a quente em escala piloto.

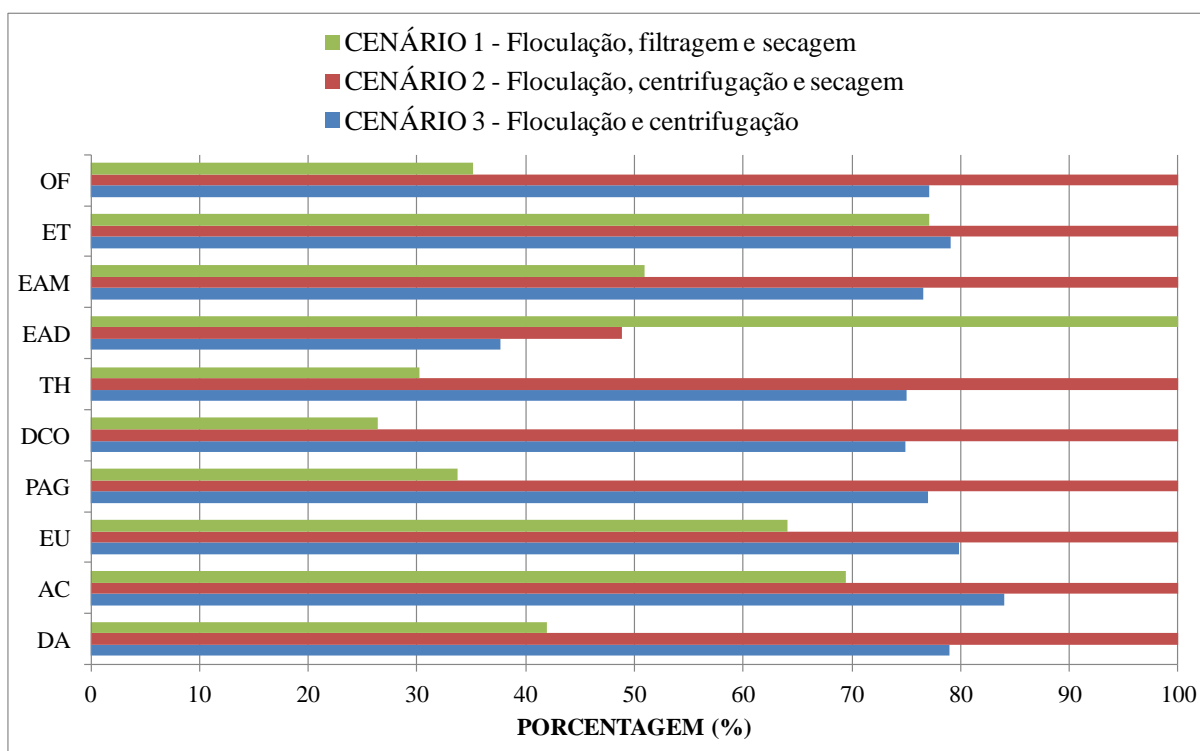


FIGURA 5.14. Comparação dos cenários de recuperação da biomassa.

Conforme supracitado, a maioria dos impactos estão relacionados ao alto consumo energético das tecnologias, além disso, a produção do cobre utilizado nos cabos de distribuição da eletricidade é responsável pela emissão de substâncias tóxicas que levam a impactos ambientais como eutrofização, toxicidade humana e aquecimento global (FIGUEIREDO et al., 2012), e também na queima de carvão em usinas termelétricas para a

geração de energia.

Portanto, a escolha de métodos de recuperação eficientes a partir de qualquer sistema de cultivo (lagoa aberta ou fotobiorreator) é essencial para a produção de biodiesel a partir de microalgas em larga escala. E segundo Pragya et al. (2013), atualmente a integração das técnicas tem obtido bons resultados na etapa de recuperação da biomassa microalgal, reduzindo assim entradas como energia elétrica, agentes floclantes, consequentemente melhorando o perfil ambiental do processo. Chen et al. (2011) complementa, que um método ideal de recuperação deve ser independente da espécie de microalga cultivada, utilizando menores quantidade de produtos químicos e energia.

5.1.4 Métodos de extração dos ácidos graxos das microalgas

Dois processos de extração dos ácidos graxos foram investigados, sendo eles: i) saponificação e ii) extração a quente, e o impacto dos mesmos foi quantificado sobre o meio ambiente. A Avaliação do Ciclo de Vida foi usada como uma ferramenta para determinar o impacto ambiental gerado para cada processo. Após a obtenção dos materiais e energia a partir do levantamento das entradas e saídas, estes dados foram utilizados para a análise de inventário e caracterização das categorias de impacto ambiental no software *SimaPro* através do método CML 2000.

Comparações relativas entre os processos de extração foram realizados para cada categoria de impacto ambiental, com o maior dos dois valores para cada categoria definida como 100% e a outra mostrada como o nível relativo ao anterior, conforme apresentado na FIGURA 5.15.

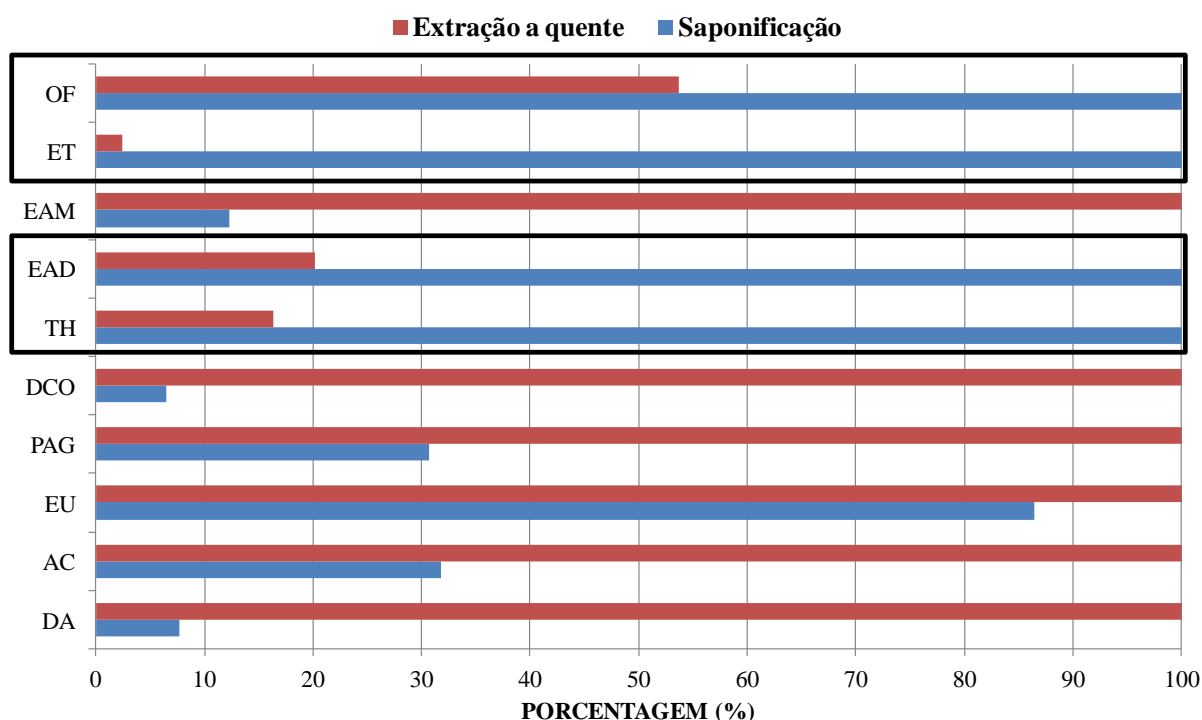


FIGURA 5.15. Impactos ambientais dos processos de extração dos ácidos graxos de microalgas.

Na FIGURA 5.15, pode ser observado que das 10 categorias de impacto analisadas do método CML, o processo de extração dos ácidos graxos através da saponificação se mostrou com menores emissões para DA (92,35%), AC (68,17%), EU (13,53%), PAG (69,35%), DCO (93,56%) e EAM (87,68%), isso pode ser explicado devido o processo de saponificação necessitar de menores entradas para ácido acético e uso de energia elétrica, quando comparado com a extração a quente, no entanto, apresentou maiores emissões para OF (46,26%), ET (97,55%), EAD (79,86%) e TH (83,63%), que podem ser explicados devido à geração de efluentes como águas contaminadas, uma vez que o hidróxido de sódio, o ácido acético e o etanol não são recuperados nesse processo, contudo, é necessário o desenvolvimento de metodologias com menores riscos ambientais e com um baixo consumo de energia, além de um sistema que considere a recuperação destes, principalmente do etanol. Enquanto isso, uma das vantagens percebidas da extração a quente é o processo que não gera desperdício comparado com o processo de saponificação.

TABELA 5.7 – Quantificação das emissões pelo Método CML 2000 para a etapa de extração dos ácidos graxos.

Categoria de impacto	Unidade	Saponificação	Extração à quente
Depleção Abiótica (DA)	kg Sb eq	9,79E+01	1,20E+02
Acidificação (AC)	kg SO ₂ eq	6,35E+01	5,89E+01
Eutrofização (EU)	kg PO ₄ eq	5,75E+00	7,08E+00
Potencial de Aquecimento Global (PAG)	kg CO ₂ eq	1,23E+04	1,51E+04
Depleção da Camada de Ozônio (DCO)	kg CFC-11 eq	8,59E-04	4,68E-04
Toxicidade Humana (TH)	kg 1,4-DB eq	3,17E+04	4,21E+04
Ecotoxicidade de Água Doce (EAD)	kg 1,4-DB eq	1,20E+03	1,70E+03
Ecotoxicidade de Água Marinha (EAM)	kg 1,4-DB eq	2,44E+05	3,22E+05
Ecotoxicidade Terrestre (TH)	kg 1,4-DB eq	1,19E+02	1,83E+02
Oxidação Fotoquímica (OF)	kg C ₂ H ₄	2,98E+00	5,62E+00

Em uma avaliação individual dos métodos de extração, pode-se notar nas FIGURAS 5.16 e 5.17 que as principais entradas nas duas metodologias de extração dos ácidos graxos são o etanol e o hexano.

Para o processo de produção do etanol, a cultura da cana, assim como toda atividade agrícola, sempre gera algum impacto no meio ambiente, na medida em que emprega recursos naturais como água e solo e faz uso de insumos e defensivos químicos, como fertilizantes e praguicidas, contudo, dentre todos os impactos ambientais gerados para a produção do etanol sem dúvida o mais problemático tem sido a prática da queima da palha com o objetivo de facilitar o corte e a limpeza do terreno (RODRIGUES, 2010).

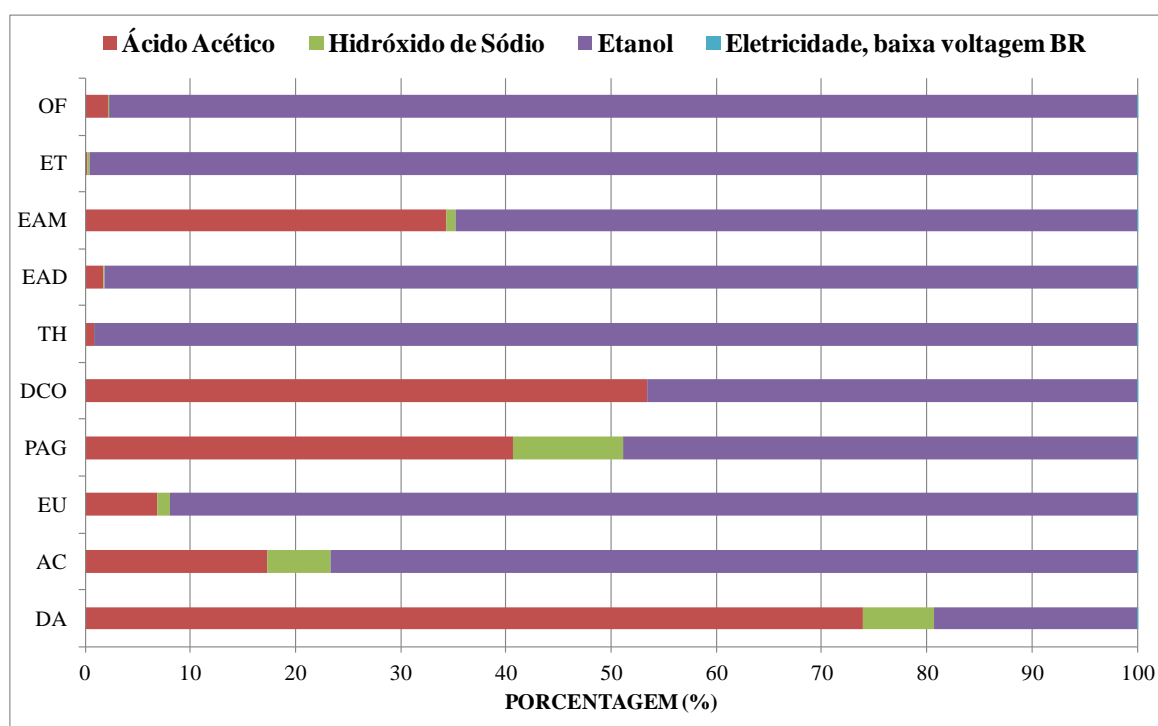


FIGURA 5.16. Contribuição dos impactos ambientais na etapa de extração dos ácidos graxos através da saponificação.

A prática de submeter os canaviais à despalha com o uso de fogo provoca emissões de poluentes como material particulado (MP), hidrocarbonetos, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x) para a atmosfera (ANDRADE e DINIZ, 2007; COELHO e GUARDABASSI, 2014). Estudos apontam que o material particulado gerado a partir da queima de biomassa é constituído por aproximadamente 94% de partículas finas e ultrafinas, e é o poluente que apresenta maior toxicidade, com o agravante de que essas partículas são plenamente capazes de atingir o sistema respiratório do ser humano. Além disso, estes poluentes podem se deslocar do local originário e se transportar até longas distâncias, aumentando o potencial de impactos negativos sobre a qualidade do ar e a saúde dos indivíduos (ARBEX et al, 2010).

Em uma análise de contribuição para o processo de produção do etanol realizada por Silva (2012) revelou que emissões estão atreladas a utilização de defensivos agrícolas na etapa de plantio. Onde para a categoria ecotoxicidade em água doce a infraestrutura, à produção de energia elétrica e à produção dos maquinários agrícolas são as etapas do ciclo de vida mais contribuintes, assim como o consumo de combustíveis fósseis para acidificação, depleção da camada de ozônio e potencial de aquecimento global, devido, principalmente ao dióxido de carbono (CO₂), emitido pelo uso de diesel nos equipamentos agrícolas, nos ônibus e nos caminhões. Além disso, para o aumento do PAG a emissão dos gases hidrocarbonetos, metano e monóxido de carbono, exalados durante a queimada são os principais responsáveis, além da transformação no uso da terra também costuma ser um fator de impacto para essa categoria.

Também se identifica a massiva contribuição das substâncias metolacoloro, carbofuran, atrazina e diuron para a ecotoxicidade de água doce, o que confirmam os estudos de Ometto (2000), em que a ecotoxicidade hídrica pode ser causada principalmente, pelas atividades de preparo do solo e tratamentos culturais, devido ao uso intensivo de agrotóxicos no solo, que apresentam a possibilidade de percolação ou lixiviação para os recursos hídricos. Para toxicidade humana a infraestrutura necessária ao ciclo de vida em análise também exerce um importante papel já que a produção do maquinário e da planta se faz presente. Além disso, os agrotóxicos podem determinar efeitos sobre a saúde humana, dependendo da forma e tempo de exposição e do tipo de produto por sua toxicidade específica.

Para Silva (2012) a eutrofização, que afeta sistemas aquáticos e a qualidade destes ecossistemas em virtude do excesso de nutrientes e matéria orgânica, estão relacionadas às atividades que incorporam nutrientes ao solo durante a fase agrícola, ou seja, os tratamentos culturais, a fertirrigação e o plantio, aumentando a produtividade biológica, permitindo

periódicas proliferações de algas, que tornam a água turva e com isso podem causar deficiência de oxigênio pelo seu apodrecimento, aumentando sua toxidez para os organismos que nela vivem (como os peixes, que aparecem mortos junto a espumas tóxicas).

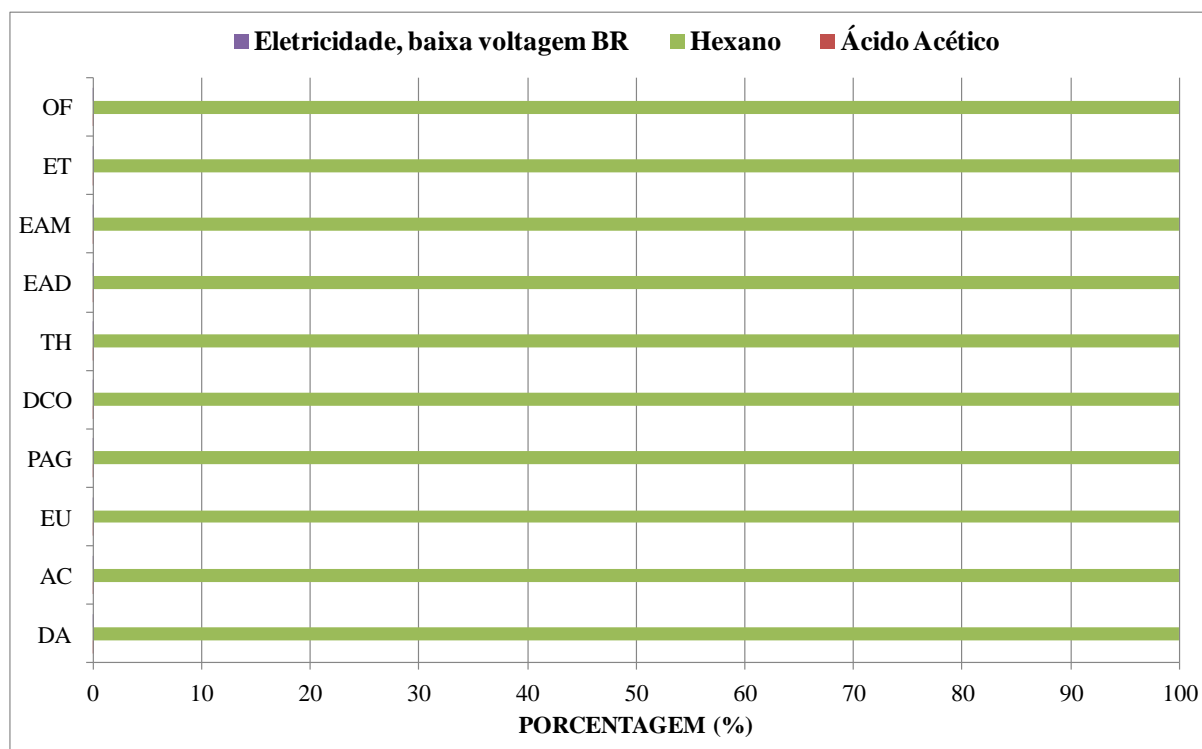


FIGURA 5.17. Contribuição dos impactos ambientais na etapa de extração dos ácidos graxos através da extração a quente.

Como observado na FIGURA 5.17, o hexano é o principal responsável pelas emissões da metodologia de extração a quente. O hexano é o solvente comumente utilizado para extração de óleo vegetal no Brasil, nos casos em que se usa solvente, como na produção do óleo de soja. O hexano é uma fração leve resultante do refino do petróleo. Marzullo (2007) apresentou um inventário da produção de hexano publicado por Bousted (1996 apud MARZULLO, 2007), contendo as emissões de CO₂, N₂O e CH₄ do processo, entre outras. Aplicando o potencial de aquecimento global (PAG), obteve-se o valor de 1,059 ton de CO₂eq/ton de hexano produzido.

Portanto, com essa análise das metodologias de extração dos ácidos graxos verificou-se que o processo de saponificação gerou menor impacto sobre o meio ambiente, devido às menores necessidades de ácido acético, etanol e hidróxido de sódio durante a reação, e menor uso de energia elétrica. Por conseguinte, a fim de tornar o processo viável do ponto de vista ambiental, será necessária uma coluna de destilação no processo para a recuperação do etanol, uma vez que nesse processo não estamos considerando a sua recuperação, essa coluna de

preferência com uma tecnologia que consuma pouca energia. Além disso, outra sugestão para reduzir a utilização do etanol na saponificação seria utilizar o metanol como solvente, uma vez que o mesmo é mais barato, possui cadeia mais curta com uma maior polaridade, o que facilita a separação entre os ésteres e o subproduto e ou resíduos, no entanto, o mesmo é obtido de fontes fósseis e é altamente tóxico quando comparado com o etanol, o que poderia aumentar os riscos ambientais devido a um possível acidente no manuseio do produto, o que coloca em dúvida o uso do metanol em escala industrial.

Neste sentido, sugere-se também avaliar o uso de outros ácidos como o sulfúrico ou clorídrico em substituição ao ácido acético, o que poderia contribuir significativamente redução dos impactos ambientais da etapa.

5.1.5 Conversão dos ácidos graxos em biodiesel pela esterificação enzimática

Para a conversão dos ácidos graxos das microalgas em biodiesel foi utilizado a metodologia de esterificação enzimática. A FIGURA 5.18 apresenta a comparação ambiental da esterificação dos ácidos graxos extraídos por tecnologias diferentes conforme discutido no item 5.4, e através da ACV foi possível determinar o impacto ambiental gerado para cada processo. Após a obtenção dos materiais e uso de energia elétrica a partir do levantamento das entradas e saídas, estes dados foram utilizados para a análise de inventário no software *SimaPro* através do método CML 2000. Comparações relativas entre os processos de conversão do óleo de microalgas foram feitas para cada impacto ambiental, com o maior dos dois valores para cada categoria definida como 100% e a outra mostrada como o nível relativo ao anterior.

Nota-se que o processo de esterificação enzimática do óleo obtido por extração a quente apresenta menores emissões em todas as categorias de impacto analisadas para o método CML 2000 em torno de 50% conforme observado na TABELA 5.8, isso pode ser explicado devido às menores exigências de solventes como hexano na reação para conversão dos ácidos graxos quando observada a tabela de entradas e saídas da etapa de conversão dos ácidos graxos extraídos através da extração a quente.

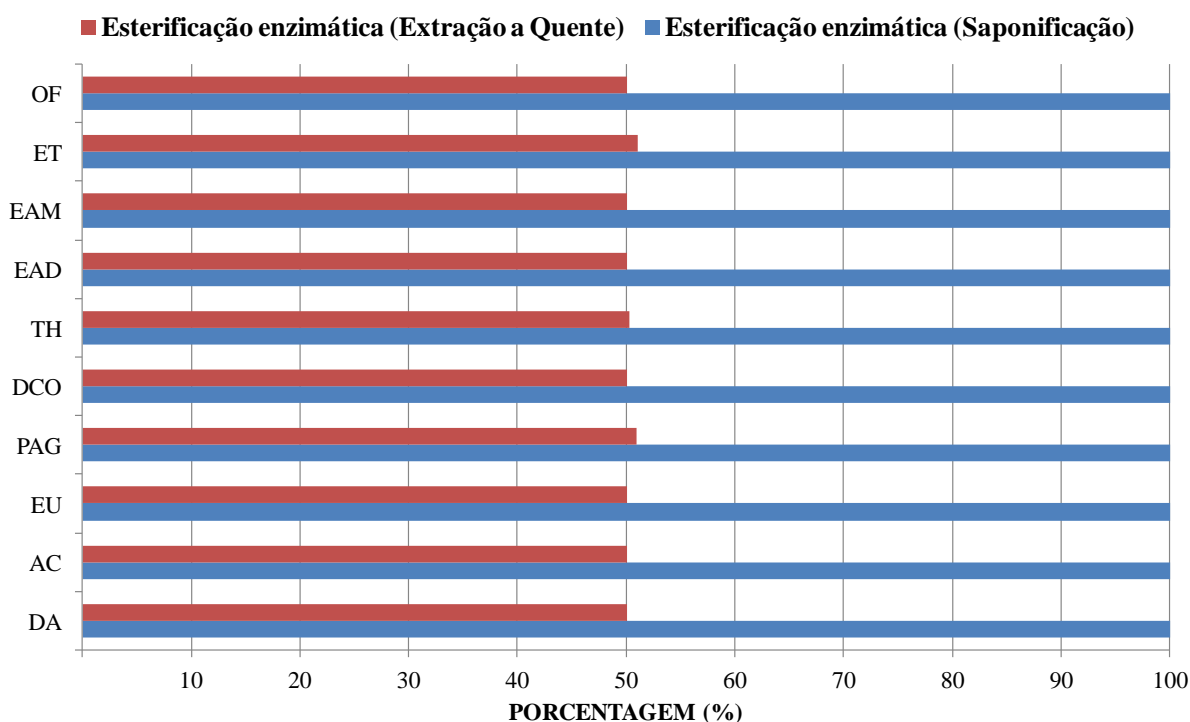


FIGURA 5.18. Impactos ambientais dos processos de esterificação enzimática dos ácidos graxos.

TABELA 5.8 – Quantificação das emissões pelo Método CML 2000 para a esterificação enzimática dos ácidos graxos.

Categoria de impacto	Unidade	Esterificação enzimática (Saponificação)	Esterificação enzimática (Extração a quente)
Depleção Abiótica (DA)	kg Sb eq	8,47E+00	4,24E+00
Acidificação (AC)	kg SO ₂ eq	2,10E+00	1,05E+00
Eutrofização (EU)	kg PO ₄ eq	2,26E-01	1,13E-01
Potencial de Aquecimento Global (PAG)	kg CO ₂ eq	2,55E+02	1,30E+02
Depleção da Camada de Ozônio (DCO)	kg CFC-11 eq	1,56E-04	7,81E-05
Toxicidade Humana (TH)	kg 1,4-DB eq	7,11E+01	3,58E+01
Ecotoxicidade de Água Doce (EAD)	kg 1,4-DB eq	6,95E+00	3,48E+00
Ecotoxicidade de Água Marinha (EAM)	kg 1,4-DB eq	2,39E+04	1,20E+04
Ecotoxicidade Terrestre (TH)	kg 1,4-DB eq	3,81E-01	1,94E-01
Oxidação Fotoquímica (OF)	kg C ₂ H ₄	7,00E-01	3,51E-01

Pode ser observado nas FIGURAS 5.19 e 5.20 que para as etapas de conversão o hexano como uma das principais entradas. O hexano é muito utilizado em extrações de óleos e gorduras vegetais ou animais. Além desses usos, o produto é também utilizado em outros segmentos industriais, tais como na indústria de adesivos, quando se necessita de elevada taxa de evaporação, e na indústria de borrachas leves, além de outras aplicações.

No entanto, segundo informações no site do fabricante do produto (site REFINARIA ALBERTO PASQUALINI), o mesmo é altamente inflamável e reage violentamente com

materiais oxidantes. Em relação à toxicidade humana é considerado narcótico e irritante, podendo causar queimadura química em contato prolongado. Para as categorias relacionadas à ecotoxicidade marinha, de água doce e terrestre, a influência do uso do hexano se dá por ser considerado um poluente hídrico, podendo transmitir qualidades indesejáveis à água, com prejuízo de seu uso, pode afetar o solo e, por percolação, degradar a qualidade da água do lençol freático. Também seus vapores são prejudiciais ao meio ambiente, influenciando para o aumento do PAG.

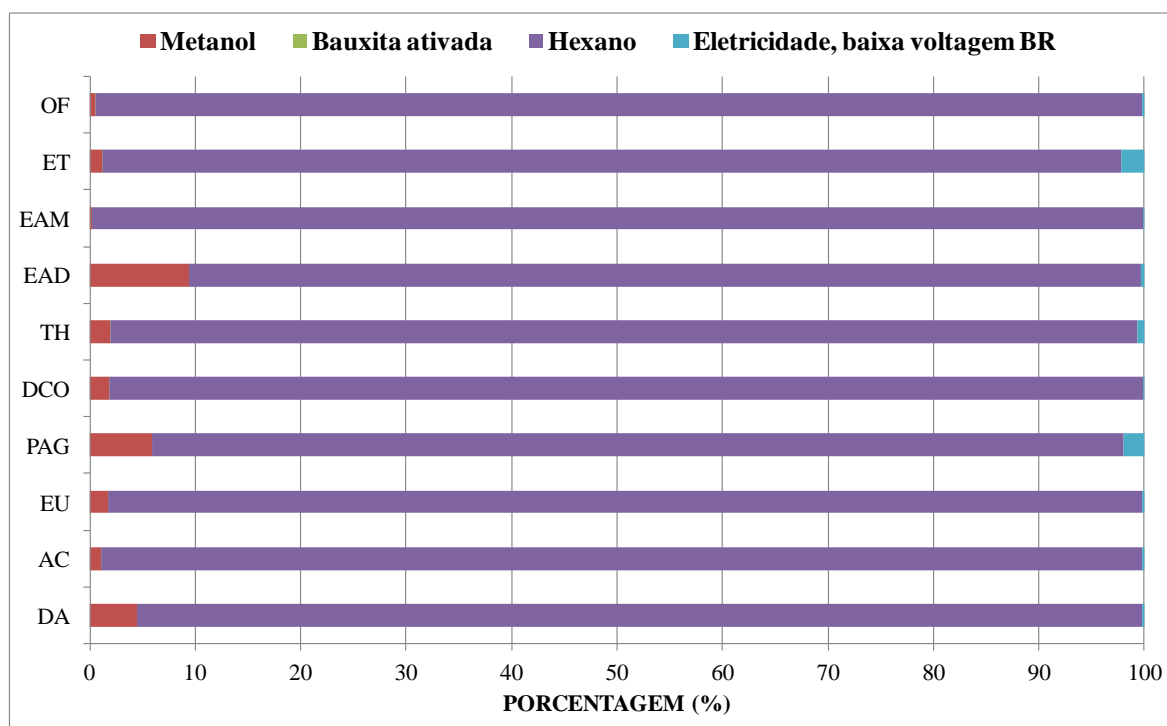
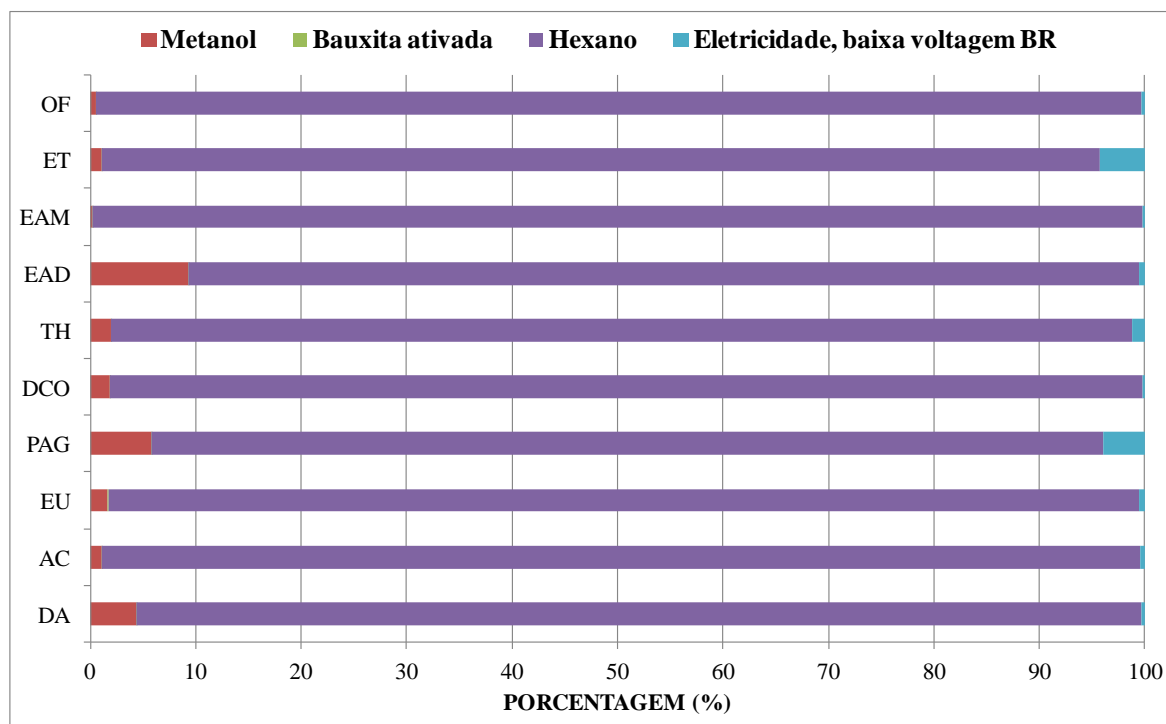


FIGURA 5.19. Avaliação individual da esterificação dos ácidos graxos extraídos através a metodologia de saponificação



5.20. Avaliação individual da esterificação dos ácidos graxos extraídos através a metodologia de extração a quente.

Portanto, para se reduzir os impactos ambientais devido ao uso do hexano, é necessário um maior desenvolvimento desta tecnologia para minimizar a dependência de do mesmo durante a esterificação, e também deve ser considerada a possibilidade de recuperação deste, consequentemente reduzindo os impactos em todas as categorias analisadas para o método CML 2000, ou também considerar a possibilidade de utilização de outros solventes na conversão dos ácidos graxos.

5.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E IDENTIFICAÇÃO DA OPÇÃO MAIS ADEQUADA PARA CADA ETAPA DO PROCESSO ESTUDADO

A eficiência de um sistema de gestão deve consistir de uma solução ambientalmente sustentável que minimize os impactos associados a cargas ambientais originadas na aplicação da metodologia considerada. Essa minimização deve ser dirigida tanto às emissões para a atmosfera, quanto à conservação dos recursos energéticos e materiais. Para isso, utilizou a metodologia de ACV com intuito de quantificar de forma global e objetiva as cargas ambientais da produção de biodiesel de microalgas, através da combinação de tecnologias compondo o cenário mais indicado.

Com a combinação de tecnologias, são observadas reduções significativas no potencial de aquecimento global e eutrofização, com reduções consideráveis no uso da água e

solo quando comparado os cultivos em FBR e lagoas abertas. Conforme descrito na metodologia, foram avaliados dois sistemas de cultivos, no qual o FBR se destacou com menores emissões em uma escala temporal de 20 anos comparado com a lagoa aberta. Para a fonte nutricional utilizada nos cultivos, o meio alternativo composto de efluentes da suinocultura se destaca com a redução de água utilizada no sistema, também devido à minimização dos impactos ambientais da não utilização de nutrientes sintéticos.

Na etapa de recuperação da biomassa microalgal, foram analisados quatro agentes floclulantes em relação a sua eficiência de floclulação e também ambiental. Para eficiência de floclulação, o hidróxido de sódio se destacou com uma eficiência maior que 90%, além disso, o seu uso não compromete a biomassa, devido à descoloração da biomassa comparada com o cloreto férrico. Considerando as tecnologias utilizadas, considerou-se 3 cenários para recuperação da biomassa microalgal, considerando como produto final dessa etapa a biomassa seca e úmida. O cenário favorável ambientalmente que se destacou com redução de emissões para as categorias de impacto consideradas pela metodologia de ACV, foi o cenário 3 (floclulação seguido da centrifugação para a obtenção de biomassa úmida, e o cenário 1 (floclulação, filtragem simples seguido da secagem térmica) para biomassa seca.

Para a etapa de extração do óleo a metodologia de extração a quente seguida da esterificação enzimática se destacaram com menores emissões em todas as categorias de impacto ambiental.

Finalmente, pode-se enfatizar que existe uma necessidade de padronizar a qualidade dos dados para o inventário utilizado, especialmente com a finalidade de comparar metodologias e estudos. Neste estudo, utilizaram-se dados experimentais coletados em uma planta física em operação, enquanto que na maioria dos casos, os dados foram obtidos a partir de um inventário bibliográfico ou foram extrapolados a partir de processos industriais utilizados para outros modelos de produção de biocombustíveis como o de soja.

Em uma análise de sensibilidade, são propostas ações para melhorar os parâmetros críticos, por exemplo, como mostra a FIGURA 5.21, é sugerido a substituição do uso de PVC nos tubos transparentes pelo vidro. Nota-se que a utilização de vidro para os tubos transparentes apresenta menores emissões na maioria das categorias de impacto ambiental, no entanto, deve ser levada em consideração a fragilidade do vidro comparado com o PVC tanto na montagem quanto operação do sistema de cultivo.

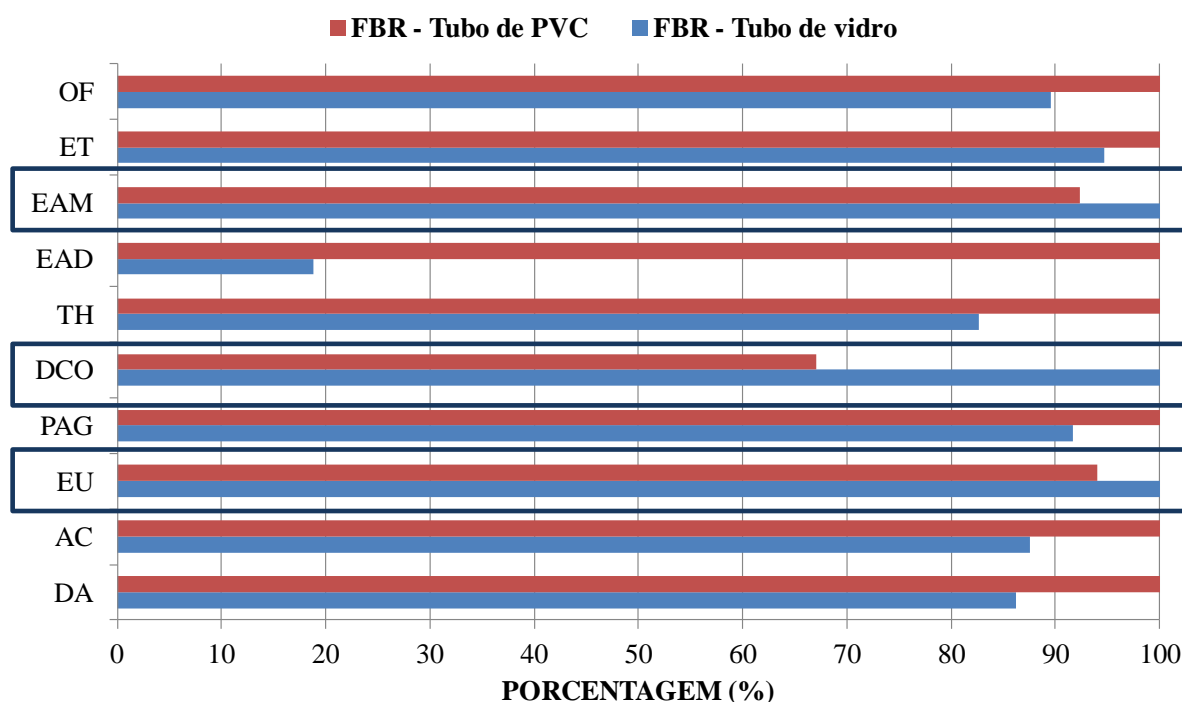


FIGURA 5.21. Comparação da montagem do FBR com tubos transparentes de PVC e de vidro.

Para a etapa de cultivo sugerem-se a utilização de gases de combustão com elevadas concentrações de CO_2 , também pode reduzir os impactos ambientais da etapa de cultivo, pois esta estratégia pode reduzir o volume de gás que requer compressão, diminuindo os requisitos energéticos para a compressão do ar para os cultivos. Também estudos com outras espécies de microalgas com elevada produtividade e elevado teor de óleo, como o caso de organismos geneticamente modificados, dado que devido ao elevado teor de óleo, seriam necessários menores requisitos nutricionais na fase de cultivo e energéticos na fase de extração de óleo e consequentemente ocorreria uma diminuição do PAG associado ao processo de produção de biodiesel microalgal.

Na etapa de recuperação da biomassa, neste estudo foi definido como flocculante com elevada eficiência de floculação e ambiental o NaOH, no entanto, outros flocculantes potenciais não foram avaliados, como exemplo, a utilização de flocculantes naturais como a quitosana que é um flocculante promissor pois é fabricado a partir de resíduos de pesca e outra alternativa para melhorar o perfil ambiental do processo é a utilização do tanino, entretanto, essas sugestões precisam ser analisadas futuramente.

Ainda para a etapa de recuperação da biomassa, outra opção seria a utilização de secagem solar ou do calor residual proveniente de centrais elétricas para secar a biomassa microalgal, pois a eliminação da secagem por combustíveis fósseis acoplada com o calor residual dos gases de combustão podem resultar em uma redução do uso de energia elétrica e

consequentemente reduzir o PAG do processo.

Analisando a etapa de extração dos ácidos graxos, foi sugerida a substituição do ácido acético pelo ácido sulfúrico, e pode-se observar que foram reduzidos os impactos ambientais em praticamente todas as categorias, exceto para acidificação conforme mostra a FIGURA 5.22.

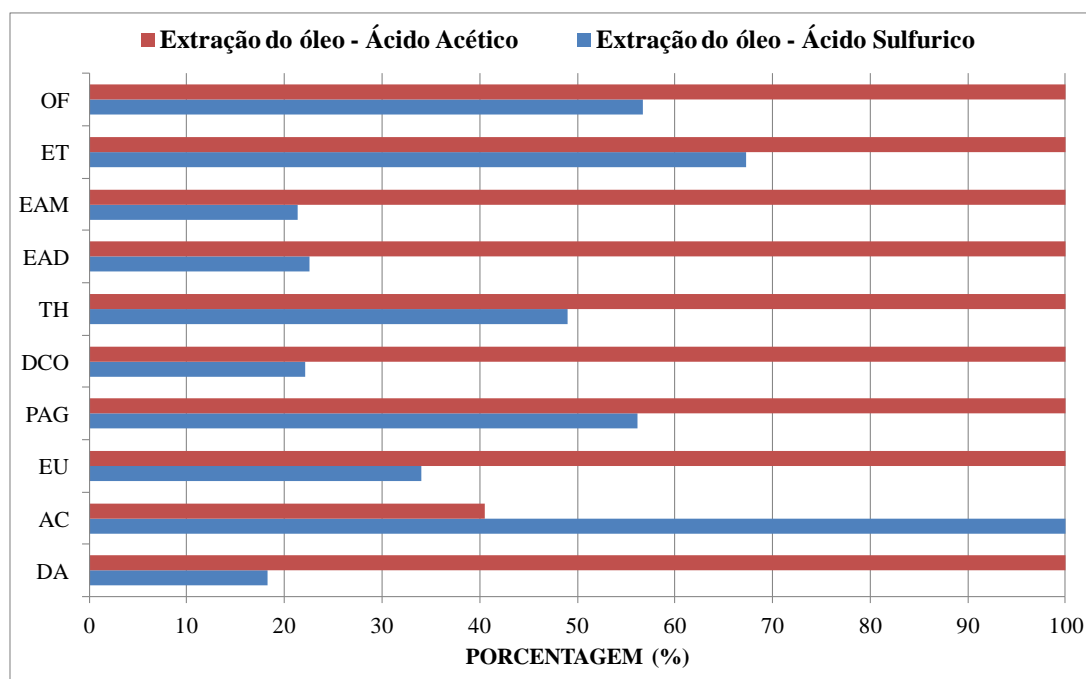
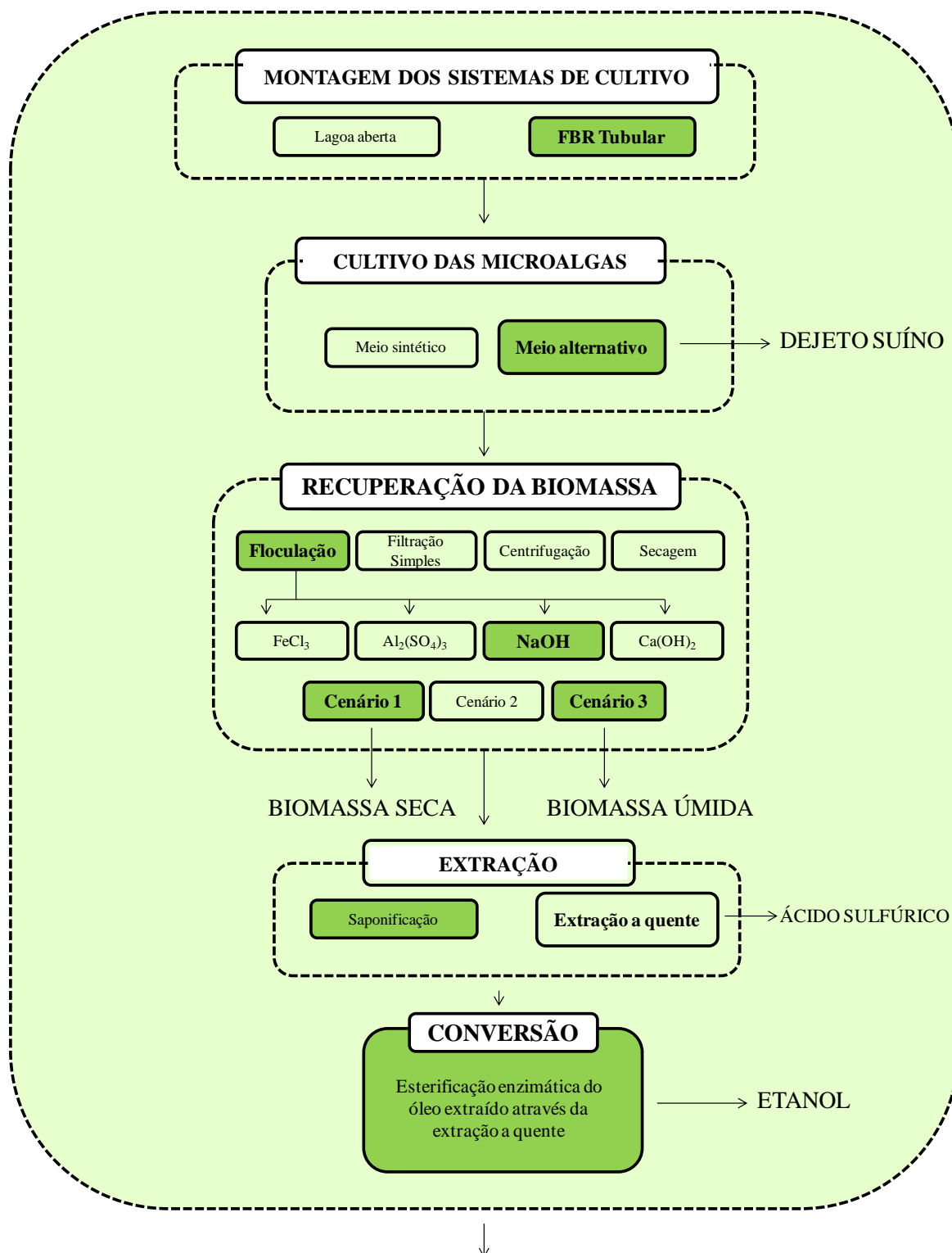


FIGURA 5.22. Comparação da extração do óleo de microalgas utilizando o ácido acético e o ácido sulfúrico.

Portanto, é pertinente concluir que a substituição do ácido acético pelo ácido sulfúrico reduz os impactos ambientais da etapa, e contribui para uma redução dos impactos ambientais de toda a cadeia de produção do biodiesel de microalgas.

A utilização dos coprodutos da produção de biodiesel microalgal como fonte de energia renovável, por exemplo, o metano gerado através da digestão anaeróbia da biomassa microalgal residual pode compensar ambas as necessidades de energia elétrica e calorífica, tornando o processo autosuficiente, produzindo ainda um excesso de energia elétrica, portanto reduzindo o PAG, no entanto, isso precisa ser avaliado cuidadosamente em trabalhos futuros.

Após essa análise de sensibilidade, na FIGURA 5.23 é apresentado o sistema de fluxograma com a opção tecnológica avaliada mais indicada para as etapas consideradas. Entre as opções tecnológicas consideradas, o caso mais favorável dentro de cada etapa está realçado em verde.



25 LITROS DE BIODIESEL DE MICROALGAS

FIGURA 5.23. Gráfico de fluxos do sistema com opções a cada etapa do processo de produção do biodiesel de microalgas. O caso favorável ambientalmente está realçado em verde.

5.3 COMPARAÇÃO DO MELHOR CENÁRIO DA PRODUÇÃO DO BIODIESEL DE MICROALGAS NO NPDEAS COM BIODIESEIS DE OUTRAS FONTES

A análise da distribuição dos impactos ambientais e sua comparação com os impactos gerados por outros biocombustíveis demonstram que o biodiesel de microalga apresenta um melhor perfil ambiental para toxicidade humana e potencial de eutrofização, e quando comparado com o biodiesel de soja, por ser a fonte oleaginosa mais abundante na produção de biodiesel atualmente no Brasil, nota-se que apresenta menores impactos ambientais também para oxidação fotoquímica, conforme mostra a FIGURA 5.24.

Também pode-se observar na FIGURA 5.24, que o biodiesel de microalgas apresenta maiores emissões para EAM, PAG, AC e DA, emissões estas que podem estar associadas às incertezas significativas devido ao levantamento dos dados, uma vez que não existe um banco de dados para a produção de biodiesel de microalgas no Ecoinvent, diferente dos outros três biodieseis que já apresentam um inventário publicado, assim como a questão logística estabelecida dos mesmos.

O cultivo de microalgas para a produção de biodiesel também se mostra vantajoso em várias perspectivas, tais como rápida reposição e multiplicação celular e devido à suas dimensões microscópicas, não implica em grandes extensões para sua cultura, o intenso consumo de dióxido de carbono e a composição celular ricamente oleaginosa.

Além disso, vale salientar que este modelo de cultivo não gera efeitos sobre a indústria alimentícia, pois não suscita concorrência pelos terrenos cultiváveis. A literatura atual lista uma série de vantagens das microalgas em detrimento às outras matrizes vegetais energéticas: potencial de produção de óleo de 7 a 30 vezes superior ao das oleaginosas típicas, como girassol, mamona, palma e soja; possibilidade de produção contínua, sem período de plantio e entressafra; e, por fim, taxa de sequestro de carbono muito superior a dos vegetais terrestres (site BIODIESELBR, 2013).

Nesse contexto, a obtenção de biodiesel a partir do óleo de microalgas torna-se uma possibilidade de biocombustível alternativo eficiente em relação a diversos parâmetros quando comparado com outras fontes oleaginosas terrestres, como por exemplo, a área de cultivo necessário para as microalgas é exclusivamente em meio aquático com possibilidade de verticalização como o caso dos cultivos no NPDEAS, o que exclui a necessidade da exploração horizontal em terra arável, sendo, portanto, uma matriz vegetal energética eficiente em termos de aproveitamento de área de cultivo.

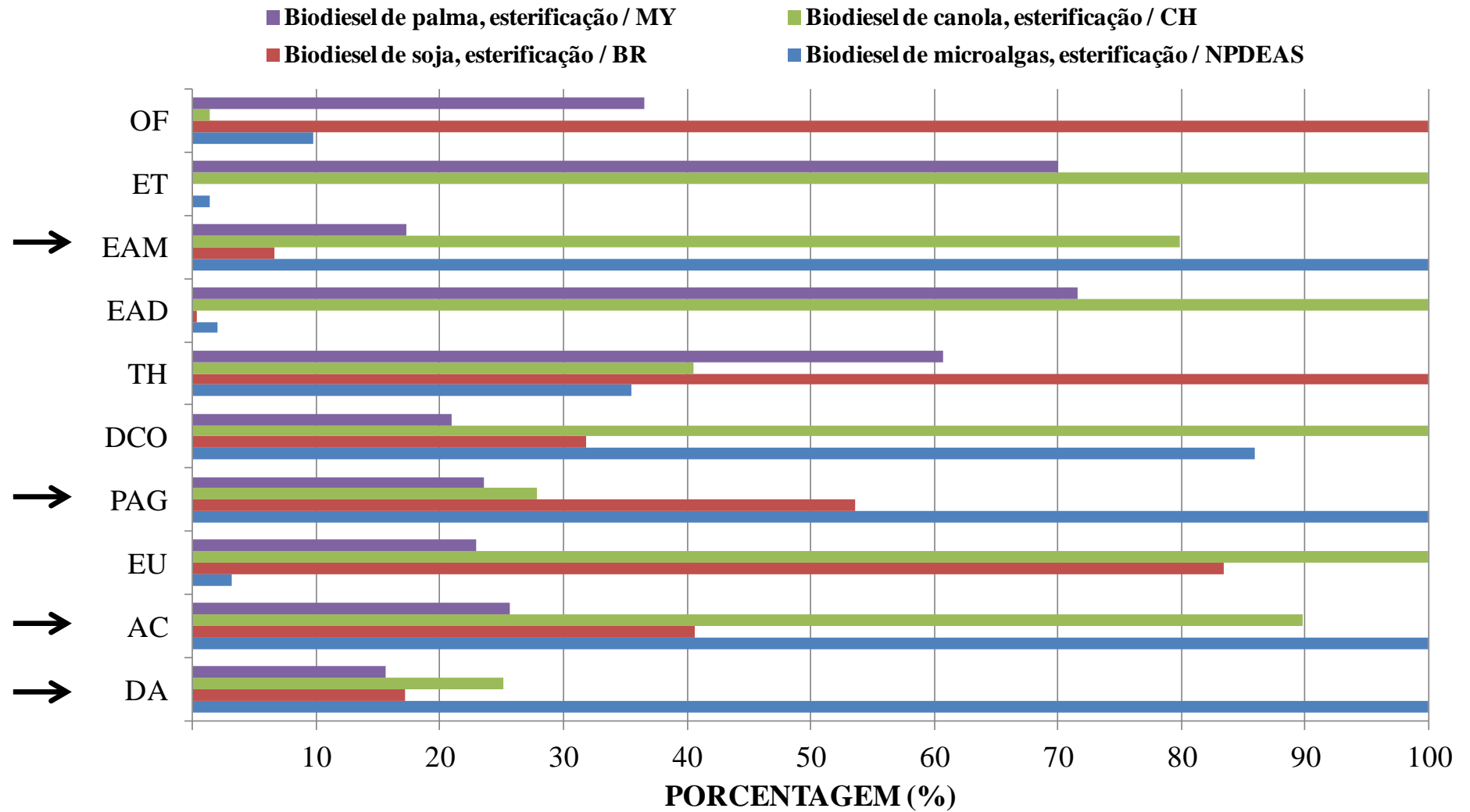


FIGURA 5.24. Comparação ambiental da produção dos biodieseis de microalgas, soja, canola e palma.

Ainda em comparação com diferentes fontes oleaginosas, como soja, mamona, girassol, palma, as microalgas possuem uma vantagem com relação às dificuldades de cultivo, como por exemplo, os problemas relacionados à infecção por patógenos que prejudicam o desenvolvimento de algumas plantações, e também a não utilização de defensivos contra esses patógenos, uma vez que as microalgas não apresentam esse tipo de susceptibilidade. Além disso, quando comparado os ciclos de produção, o cultivo das microalgas pode ser estável e contínuo, sem período de entressafra. Outro aspecto importante é o fato de que as microalgas podem utilizar matéria orgânica derivada de águas residuais como nutrientes para seu crescimento.

Observa-se na FIGURA 5.25, avaliação do melhor cenário de produção do biodiesel de microalgas no NPDEAS, e se pode identificar que o aço usado na estrutura do FBR contribui para o aumento das emissões em todas as categorias analisadas, no entanto, uma alternativa para melhorar o perfil ambiental do biodiesel de microalgas comparado com os outros biodieseis avaliados nesse trabalho, é avaliar a sustentabilidade do uso de materiais ecológicos na montagem do FBR ou reutilizados; uso de flocantes naturais como quitosana ou tanino, e, além disso, outro ponto de partida para a viabilidade econômica e ambiental da produção de energia a partir de biomassa de microalgas é a produção do biodiesel com um balanço energético favorável. Portanto, para os próximos estudos deve ser levada em consideração a necessidade dessa avaliação energética, podendo ser calculada com a energia contida no produto final dividido pela Demanda de Energia Acumulada ao longo da cadeia de produção.

É importante relatar também que apesar do processo de produção do biodiesel de microalgas no NPDEAS exigir grandes entradas de energia elétrica conforme TABELAS de entradas apresentadas no item quatro, a rede elétrica dos EUA, que é predominantemente derivada de combustíveis fósseis emite mais GEE e é menos eficiente na conversão de energia em comparação com a brasileira. Segundo dados publicados no Ecoinvent (2013) cada MJ de energia da rede elétrica de média tensão exige 3,55 MJ nos EUA e 1,4 MJ na brasileira. A razão é que a energia hidroelétrica emite menos GEE e é mais eficiente do que a termoelectricidade a partir de combustíveis fósseis. O fato de que a matriz energética brasileira emitir menos GEE e ser mais eficiente em comparação com a média mundial coloca o país em uma posição favorável para promover a produção de biomassa microalgal como fonte de energia renovável.

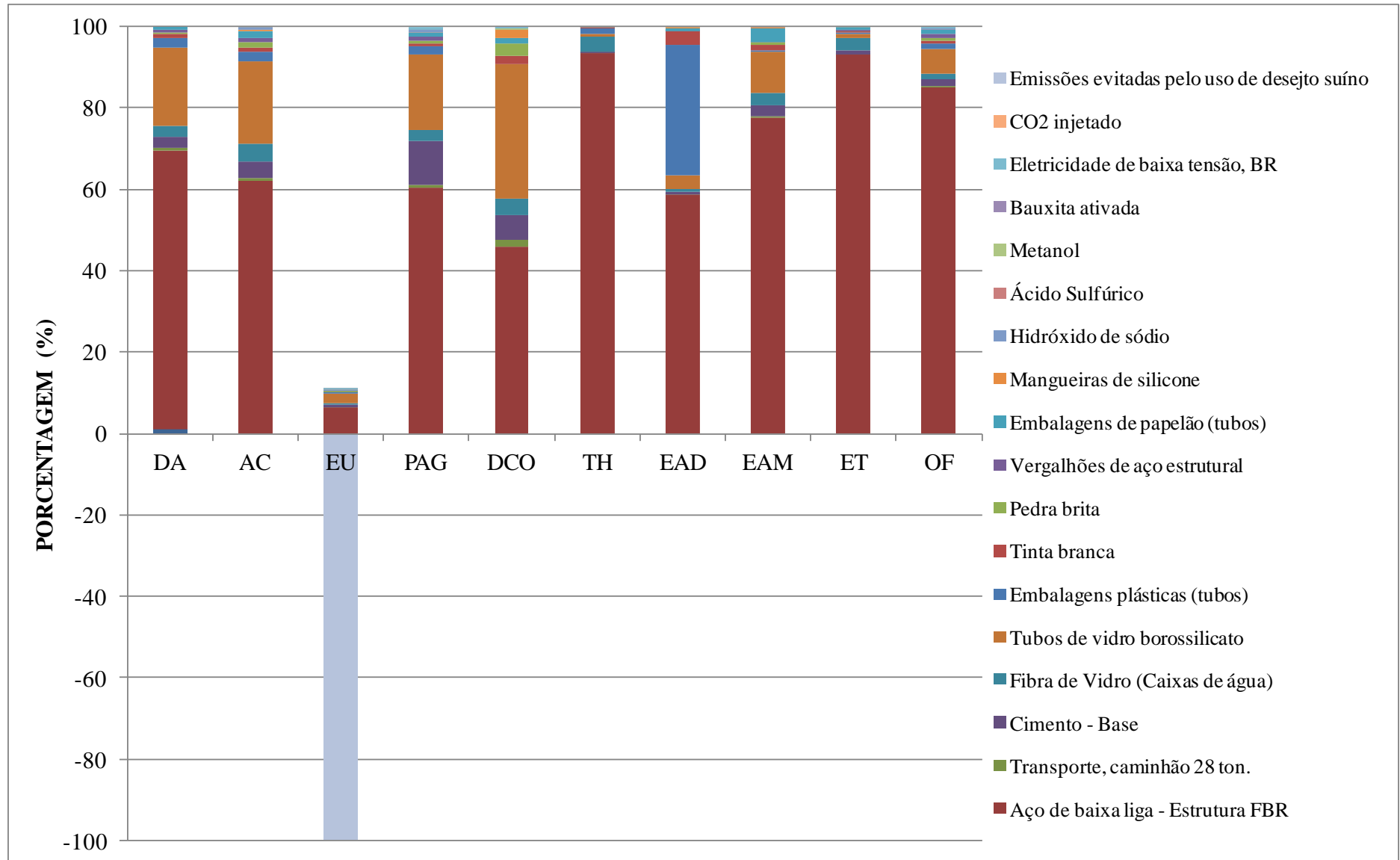


FIGURA 5.25. Avaliação individual do melhor cenário da produção de biodiesel de microalgas no NPDEAS.

6 CONCLUSÕES

Analisando as informações obtidas a partir da ACV contida nesse trabalho, foi identificado quais entradas ou processos se fazem mais impactantes. Além disso, os resultados confirmam o potencial das microalgas como fonte de energia, mas demonstram a necessidade de diminuir o uso de energia elétrica, fertilizantes e outros insumos, como flocculantes químicos. Conclui-se também que o uso de fotobiorreatores, nutrientes provenientes de águas residuais permitem reduções significativas no uso do solo e nas emissões de GEE.

E com base nos resultados apresentados são listadas as principais conclusões a partir dos objetivos específicos pré-estabelecidos:

1. O uso de FBR para cultivo de microalgas tem o potencial de causar menor impacto sobre o meio ambiente nas categorias AC em 7,18% e DCO em 42,53% comparado com os cultivos em lagoas abertas. Além disso, ao avaliar os impactos sobre o uso do solo, o FBR utiliza uma área 3,4 vezes menor que a lagoa aberta, confirmando o potencial do uso de FBRs para cultivo de microalgas em escala industrial.

2. Fontes de nutrientes alternativas provenientes dos efluentes da suinocultura podem ser incorporadas no cultivo microalgal, constituindo uma alternativa de baixo impacto ambiental, reduzindo em 60,41% o potencial de EAD, EAM em 79,45%, também para o PAG e EU o cultivo com efluente da suinocultura gerou um crédito deixando de emitir $1,24\text{E}+11 \text{ KgCO}_{2\text{eq}}$ e $7,03\text{E}+04 \text{ KgPO}_{4\text{eq}}$, ou seja reduziu em 100% os impactos quando comparados com o nutriente sintético Chu.

3. Para a recuperação da biomassa, o NaOH apresentou menores emissões em praticamente todas as categorias analisadas, exceto para DA e ET, no entanto, foi considerado o agente flocculante padrão dessas análises, uma vez que promoveu a coagulação com valores tão eficientes quanto 93,5% e com o melhor perfil ambiental entre os agentes flocculantes que não causaram alterações visíveis de cor na biomassa, juntamente com o acoplamento de tecnologias de flocculação e centrifugação para obtenção da biomassa úmida e flocculação e secagem térmica para biomassa seca.

4. Para a extração dos ácidos graxos a saponificação apresentou menores emissões em praticamente todas as categorias comparado com a extração a quente, com destaque para reduções em DA (92,35%) e DCO (93,56%), uma vez que exigiu menores entradas para ácido acético e uso de energia. Além disso, pela análise de sensibilidade observou que a utilização do ácido sulfúrico diminui os impactos ambientais em praticamente todas as

categorias analisadas, exceto para AC.

5. Para a esterificação enzimática dos ácidos graxos obtidos por extração a quente, apresentou menores emissões em todas as categorias de impacto analisadas para o método CML 2000 em torno de 50%, devido às menores exigências de solventes como hexano para conversão dos ácidos graxos quando comparado com os ácidos graxos obtidos via saponificação.

6. Através da análise da distribuição dos impactos ambientais e sua comparação com os impactos gerados por outros biocombustíveis, pode-se concluir que o biodiesel de microalgas apresentou um melhor perfil ambiental para TH e EU, e quando comparado com o biodiesel de soja, também apresenta reduções dos impactos ambientais para a categoria OF.

Após a avaliação de todas as etapas do processo de produção de biodiesel no NPDEAS, pode-se concluir que esse trabalho contribuiu no avanço do estado da arte na área, podendo auxiliar para o desenvolvimento de um inventário brasileiro de biodiesel de microalgas, e com o uso da metodologia de ACV mostrou que o biodiesel de microalgas tem potencial de apresentar um desempenho ambiental superior em comparação com algumas culturas terrestres. Além disso, os resultados deste trabalho serão importantes para avançar no desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e ecologicamente corretas para produção comercial em escala industrial de biodiesel de microalgas para geração de energia em futuro próximo.

Além disso, esse estudo de ACV incentivará o setor produtivo a considerar todas as questões ambientais relacionadas com o seu sistema de produção, incluindo os insumos, matérias-primas, manufatura, distribuição, uso, reuso e reciclagem, auxiliando na identificação de oportunidades de melhorias e preservação ambiental.

No entanto, o atual estado de conhecimento relativo aos potenciais impactos ambientais da produção de biocombustíveis a partir de microalgas continua a ser incompleto. Porém, as melhorias a nível tecnológico dos sistemas de produção de biocombustíveis que estão atualmente sendo estudadas irão contribuir para a melhoria do desempenho ambiental e energético do processo de produção de biodiesel a partir de microalgas, e estes conhecimentos estão evoluindo rapidamente, graças às pesquisas e desenvolvimento destes processos em escala piloto como é o caso do NPDEAS.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são itemizadas algumas propostas que podem ser aplicadas e explorados em trabalhos futuros para contribuir no desenvolvimento do estado da arte. São elas:

1. Utilização de espécies de microalgas com elevada produtividade e elevado teor de óleo, e também pesquisas relacionadas à modificação genética das microalgas.
2. Pesquisas futuras devem investigar a utilização de materiais ecológicos na construção dos fotobiorreatores. Portanto, uma alternativa para reduzir os impactos do uso do PVC nos tubos do FBR é propor a utilização de tubos de PVC obtidos pela *Green route*, ou a utilização de tubos de policarbonato.
3. Avaliação do impacto ambiental do uso de flocculantes naturais, como tanino e quitosana.
4. Investigação do uso da secagem solar ou calor residual proveniente de centrais elétricas para secagem da biomassa microalgal.
5. Quantificar as emissões da combustão e consequentemente seu impacto ambiental;
6. Avaliar o uso da biomassa residual para produção de calor e avaliar outros métodos de extração e conversão do óleo em escala piloto, como transesterificação.
7. Realizar o balanço energético de toda a cadeia de produção do biodiesel de microalgas no NPDEAS.
8. Recomenda-se para estudos posteriores a adição de dados ausentes, principalmente referentes aos equipamentos que não possuem até a data da realização deste trabalho inventário no *Ecoinvent*.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14040. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 10 p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 20p. 2009a.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14043. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida: interpretação do ciclo de vida. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 19 p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14044: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 46p. 2009b.
- ABU-EISHAH, S.I., EL-DIEB, A.S., BEDIR, M.S., 2012. Performance of concrete mixtures
- ADESANYA, V. O., CADENA, E., SCOTT, A. S., SMITH, A. G.. **Life cycle assessment on microalgal biodiesel production using a hybrid cultivation system.** Bioresource Technology, 163, 2014, p. 343–355.
- AHMAD, A. L., MAT-YASIN, N. H., DEREK, C. J. C., LIM, J. K.. **Optimization of microalgae coagulation process using chitosan.** Chem. Eng. J. 173, 2011, p. 879–882.
- AJAYEBI, A., GNANSOUNOU, E., KENTHORAI RAMAN, J.. **Comparative life cycle assessment of 1035 biodiesel from algae and jatropha: a case study of India.** Bioresour. Technol. 150, 2013, p. 429-37. doi: 1036 10.1016/j.biortech.2013.09.118
- ALGATECH. Disponível em: <<http://www.algatech.com/>>. Acesso em: 24 de abril 2014.
- ANDRADE, J. M. F., DINIZ, K. M. Impactos Ambientais da Agroindústria da Cana-de-açúcar: Subsídios para a Gestão. Monografia (Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz), Universidade de São Paulo, 2007.
- AMIN, S.. **Review on biofuel and gas production processes from microalgae.** Energy Conversion and Mangement. Indonesia, 50, 2009, p. 1834-1840.
- ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em:<<http://www.anp.gov.br/?pg=57522&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=13>> Acesso em: 24/05/2014.
- ARANSIOLA, E., BETIKU, E., IKHUOMOREGBE, D., OJUMU, T.. **Production of biodiesel from crude neem oil feedstock and its emissions from internal combustion engines.** Afr J Biotechnol, 11(22), 2012, p. 6178-6186.
- ARBEX, M. A. et al. Queima da Biomassa e os Efeitos sobre a Saúde. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/jbpneu/v30n2/v30n2a15.pdf>> Acesso em: 06 de abr. 2015.

ARESTA, M., DIBENEDETTO, A., BARBERIO G.. **Utilization of macro-algae for enhanced CO₂ fixation and biofuels production: development of a computing software for an LCA study.** Fuel Process Technol, 86 (14–15), 2005, p. 1679–1693.

AZEREDO, V. B. S.. **Produção de Biodiesel a partir do Cultivo de Microalgas: Estimativa Preliminar de Custos e Perspectivas para o Brasil.** Dissertação (Mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2012.

BALIGA, R., POWERS, S.E.. **Sustainable Algae Biodiesel Production in Cold Climates.** International Journal of Chemical Engineering, 2010, 1-13.

BANERJEE, A.; SHARMA, R.; CHISTI, Y.; BANERJEE, U. C. Botryococcus braunii: a renewable source of hydrocarbons and other chemicals. Crit Rev Biotechnol, v. 22, p. 245–279, 2002.

BATAN, L., QUINN, J., WILLSON, B., BRADLEY, T.. **Net Energy and Greenhouse Gas Emission Evaluation of Biodiesel Derived from Microalgae.** Environm Sci Technol, 44, 2010, p. 7975-7980.

BECKER, E. W.. **Microalgae: biotechnology and microbiology.** Cambridge University Press, 1994.

BENEMANN, J. R.. **Systems and economic analysis of microalgae ponds for conversion of CO₂ to biomass.** 4th Quarterly technical progress report. Conference: US/Japan meeting on coal energy research, Albuquerque, NM (United States), 26-30 Sep 1994; Other Information: PBD: 28 Dec 1994; Medium: ED; Size: 9 p. (1996).

BICUDO, C. E. M., MENEZES, M.. **Gêneros de Algas de Águas Continentais do Brasil: Chave para Identificação e Descrições.** São Carlos: Editora RiMa, 2005, 580p.

BIODIESELBR. Tudo sobre biodiesel. Site da Internet. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/>>. Acesso em: 15 de abr. 2015.

BOONAERT, C. J. P., C. C. DUPONT-GILLAIN, et al. **Cell Separation, Flocculation.** Encyclopedia of Bioprocess Technology, John Wiley & Sons, Inc, 2002.

BORKOWSKI, M. G., ZAIMES, G. G., KHANNA, V.. **Integrating LCA and Thermodynamic Analysis for Sustainability Assessment of Algal Biofuels: Comparison of Renewable Diesel vs. Biodiesel.** In 2012 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST), 2012, p. 1-6.

BOROWITZKA, M. A.. Culturing microalgae in outdoor ponds. In ANDERSEN, R. A. **Algal Culturing Techniques.** United States of America: Elsevier Inc, 2005, p. 205-218.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Plano Nacional de Agroenergia – 2006 – 2011. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005a. 118 p.

BRASKEM. Efeito dos plastificantes na dureza dos compostos de PVC. **Boletim técnico 01 PVC,** São Paulo, p. 1-8, jul. 2002. Disponível em: <http://www.braskem.com.br/upload/portal_braskem/pt/produtos_e_servicos/boletins/TABE

LA_de_Propriedades_de_Refer%C3%A2ncia_dos_Compostos_de_PVC.pdf>. Acesso em: 09 de abr. 2015.

BRENNAN, L., OWENDE, P.. **Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products**. *Renew Sust Energy Rev*, 14, 2010, p. 557–577.

BRENTNER, L.B., ECKELMAN, M.J., ZIMMERMAN, J. B.. **Combinatorial life cycle assessment to inform process design of industrial production of algal biodiesel**. *Environmental science & technology* 45, 2011, p.7060-7067.

CAI, T.; PARK, S. Y.; LI, Y. Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: Status and prospects. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 360-369, Mar 2013. ISSN 1364-0321. Available at: <<Go to ISI>://WOS:000314905000027 >.

CAMPBELL, P. K., BEER, T., BATTEN, D.. **Life cycle assessment of biodiesel production from microalgae in ponds**. *Biores Technol*, 102 (1), 2011, p. 50–56.

CANTER, C. E., DAVIS, R., DEMIRTAS, M. U., FRANK, E.. **Infrastructure associated emissions for renewable diesel production from microalgae**. *Algal Research* (2014). Disponível online. DOI: 10.1016/j.algal.2014.01.001

CARERE, C. R., SPARLING, R., CICEK, N., LEVIN, D. B.. **Third generation biofuels via direct cellulose fermentation**. *Int J Mol Sci*, 9, 2008, p. 1342–1360.

CARNEIRO, L., AS, I. S., GOMES, F. S., MATTA, V. M., CABRAL, L. M. C.. **Cold sterilization and clarification of pineapple juice by tangencial microfiltration**. *Desalination*, v. 148, 2002, p. 93-98.

CARVALHO JR, R. M.; VARGAS, J. V. C.; RAMOS L. P.; DERNER R. B.; MARIANO A. B. **Oil extraction and biomass productivity from microalgae in pilot scale**. In: **20th International Congress of Mechanical Engineering**. Anais. November 15-20, Gramado, RS, Brazil, Proceedings of COBEM 2009.

CETESB. Ficha de Identificação Toxicológica. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/laboratorios/files/2013/11/bario.pdf>>. Acesso em: 02 de abr. 2015.

CHEN, C.Y., YEH, K.L., AISYAH, R., LEE, D.J., CHANG, J. S.. **Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review**. *Bioresource Technology*, 102, 2011, p. 71–81.

CHEN, M., TANG, H., MA, H., HOLLAND, T. C., NG, K. Y. S., SALLEY, S. O.. **Effect of nutrients on growth and lipid accumulation in the green algae *Dunaliella tertiolecta***. *Bioresource Technology* 102, 2011, p. 1649–1655.

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends in Biotechnology*, v. 26, n. 3, p. 126-131, 2008.

CHISTI, Y.. Biodiesel from Microalgae. *Biotechnol. Adv.*, 2 , 2007, p. 294–306.

CHOWDHURY, R., VIAMAJALA, S., GERLACH, R.. **Reduction of environmental and energy footprint of microalgal biodiesel production through material and energy integration.** *Bioresource Technol*, 108, 2012, p. 102-111.

CHU, S. P.. **The influence of the mineral composition if the medium on the growth of planktonic algae.** *Journal of Ecology*, v. 30, n. 2, 1942, p. 284–325.

CLARENS, A. F.; RESURRECCION, E. P.; WHITE, M. A.; COLOSI, L. M.. **Environmental Life Cycle Comparison of Algae to other Bioenergy Feedstocks.** *Environ. Sci. Technol.*, 44 (5), 2010, p. 1813–1819.

CLARENS, A.F., NASSAU, H., RESURRECCION, E.P., WHITE, M. A, COLOSI, L.M.. **Environmental impacts of algae-derived biodiesel and bioelectricity for transportation.** *Environmental science & technology* 45, 2011, p. 7554-7560.

COELHO, S. T., GUARDABASSI, P. “Ethanol”. In: B. D. Solomon, R. Bailis (eds.), *Sustainable Development of Biofuels in Latin America and the Caribbean*, DOI 10.1007/978-1-4614-9275-7_3 © Springer Science+Business Media NewYork, 2014.

COLLET, P.; HÉLIAS, A.; LARDON, L.; RAS, M. ; GOY, R.; STEYER, J.. **Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production.** *Bioresource Technology*. n. 102, 2011, p. 207-214.

COLTRO, L. (Org.). **Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão.** Campinas: CETEA/ITAL, 2007. 75 p. Disponível em: <http://www.cetea.ital.org.br/emb_meio_ambiente.htm>. Acesso em: 15 de abr. 2014.

DANQUAH, M. K., ANG, L., UDUMAN, N., MOHEIMANI, N., FORDE, G. M.. **Dewatering of microalgal culture for biodiesel production: exploring polymer flocculation and tangential flow filtration.** *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 84 (7), 2008, p. 1078–1083.

DAS, P., LEI, W., AZIZ, S.S., OBBARDA, J. P.. **Enhanced algae growth in both phototrophic and mixotrophic culture under blue light.** *Bioresource Technology* 102, 2011, p. 3883–3887.

DAVIS, R., FISHMAN, D., FRANK, E., WIGMOSTA, M., ADEN, A., COLEMAN, A., PIENKOS, P., SKAGGS, R., VENTERIS, E., WANG, M.. **Renewable Diesel from Algal Lipids: An integrated baseline for cost, emissions, and resource potential from a harmonized model.** Argonne National Laboratory (2011). Disponível em: <<http://greet.es.anl.gov/publications>>. Acesso em: 15 de abr. 2014.

DILAY, E.. **Modelagem e simulação para engenharia de sistemas: acondicionamento de eletrônicos, navios elétricos e fotobiorreatores.** 198 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, 2013.

DIVAKARAN, R., PILLAI, V. N. S.. **Flocculation of algae using chitosan.** *Journal Appl. Phycol.*, 14, 2002, p. 419–422.

DONES, R., BAUER, C., BOLLIGER, R., BURGER, B., FAIST EMMERNERGER, M., FRICHKNECHT, R., HECK, T., JUNGBLUTH, N., RODER, A., TUCHSCHMID, M.. **Life Cycle Inventory of Energy Systems: Results for Current Systems in Switzerland and Other UCTE Countries: Ecoinvent Report No. 5.** Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dubendorf, 2007.

DUARTE, A. O peso da matéria prima. Biodieselbr, v.9, p.19, 2009.

DUFOUR, J., MORENO, J., RODRÍGUEZ, R.. **Life cycle assessment of biodiesel production from microalgae oil: effect of algae species and cultivation system.** Towards Life Cycle Sustainability Management, 2011, p. 437-442.

ECOINVENT. Ecoinvent data v 2.2. Ecoinvent reports. Dusseldorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories. 25p. 2010.

ECOINVENT. Ecoinvent data v 3 (2013). Disponível em: <http://www.ecoinvent.org/database/database.html>. Acesso em: 15 de abr. 2015.

EEA. EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. Life Cycle Assessment: a guide to approaches, experiences and information sources. Environmental Issues Series n. 6, ago. 1997.

EHIMEN, E. A.. **Energy Balance of Microalgal-derived Biodiesel.** Energ Source, 32 (2), 2010, p. 1111-1120.

ELLENBECKER, M., TSAI, S.. **Engineered nanoparticles: safer substitutes for toxic materials, or a new hazard?** Journal of Cleaner Production 19, 2011, p. 483e487.

EN 14103 DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. EN 14103: fat and oil derivatives – fatty acid methyl esters (FAME) – determination of ester and Linolenic acid methyl ester contents. Germany, 2003. 10 p.

EPA. (U.S. Environmental Protection Agency). **Life cycle assessment: principles and practice.** Ref. EPA/600/R-06/060, 2006.

EPA. (U.S. Environmental Protection Agency). **Regulations of Fuels and Fuels Additives: Changes to Renewable Fuel Standard Program; Final Rule.** Federal Register, Vol. 5, No. 58; 2010, p. 14670–14904.

ESCOBAR, J. C., LORA, E. S., VENTURINI, O. J., YANEZ, E. E., CASTILLO, E. F., ALMAZAN, O.. **Biofuels: environment, technology and food security.** Renew Sustain Energy, 13, 2009, p. 1275–1287.

EU. Biomass conversion technologies: achievements and prospects for heat and power generation. EUR 18029 EN. European Commission Directorate-General Science, Research and Development; 1999, 178.

FERREIRA, J.. Análise de ciclo de vida de produtos. Instituto Politécnico de Viseu, 2004, p. 9-16.

FIGUEIREDO, F.. **Biodiesel de girassol ou microalgas em Portugal: Uma avaliação comparativa de ciclo de vida**. Dissertação de mestrado em Engenharia do Ambiente, apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia do Ambiente da Universidade de Coimbra, 2011.

FIGUEIRÊDO, M. C. B., ROSA, M. F., UGAYA, C. M. L., SOUZA FILHO, M. S. M., BRAIT, A. C. C., MELO, L. F. L.. **Life cycle assessment of cellulose nanowhiskers**. Journal of Cleaner Production, v. 35, 2012, p. 130-139.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Levantamento da situação ambiental e energética do setor de ferroligas e silício metálico no Estado de Minas Gerais, prospecção de ações para o desenvolvimento sustentável da atividade. Gerência de Desenvolvimento e Apoio técnico às Atividades Industriais. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. 182p. Disponível em: <<http://www.feam.br/images/stories/fean/levantamento%20da%20situacao%20do%20setor%20de%20ferroligas%20-%20requisitos%20tecnicos.pdf>>. Acesso em: 02 de abr. 2015.

GALINDRO, B. M.. **Análise Técnica e Avaliação do Ciclo de Vida de Culturas de Produção de Microalgas para Biodiesel**. 92 f. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa, Florianópolis (SC), 2012.

GERIS, R., SANTOS, N. A. C., AMARAL, B. A., MAIA, I. S., DOURADO, V.. **Biodiesel de soja – reação de transesterificação para aulas práticas de química orgânica**. Quim. Nova, Vol. 30, No. 5, 2007, p. 1369-1373.

GHASEMI, Y., AMINI, S., NASERI, A., NAJAFABADY, N., MOBASHER, M., DABBAGH, F.. **Microalgae Biofuel Potentials (Review)**. Appl Biochem Micro, 48, 2012, p. 126-144.

GODOS, L., GUZMAN, H. H., SOTO, R., GARCIA-ENCINA, P. A., BECARES E., MUNOZ R., VARGAR V. A.. **Coagulation/flocculation-based removal of algal-bacterial biomass from piggery wastewater treatment**. Bioresource Technology, 102 (2011), pp. 923-927.

GOEDKOOP, M., OELE, M., SCHRYBER, A., VIEIRA, M., HEGGER, S.. SimaPro database manual. Methods library. PRé Consultants, 2010.

GOOGLE MAPS. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/preview>>. Acesso em: 02 de abr. 2014.

GRIMA, M. E., BELARBI, E. H., ACIÉN FERNÁNDEZ, F. G., ROBLES MEDINA, A., CHISTI, Y.. **Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics**. Biotechnology Advances, 20(7-8), 2003, p. 491-515.

GRIMA, M. E.. **Microalgae, mass culture methods**. In: Flickinger MC, Drew SW, editors. Encyclopedia of bioprocess technology: fermentation, biocatalysis and bioseparation, v. 3. Wiley, 1999, p. 1753-1769.

GRIS, L. R. S.. **Produção da Microalga Nannochloropsis oculata em Fotobiorreator Airlift**. Dissertação (mestrado) em Engenharia Química. 168f. Universidade Federal do Rio

Grande do Sul, 2011.

GUI, M., LEE, K., BHATIA, S.. **Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock.** Energy, 33(11), 2008, p. 1646-1653.

GUINEE J. B. et al. **Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards - Characterisation and Normalisation Factors.** Holanda: Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), 2001

GUINEE, J. B. (Ed.). Handbook of Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.

HANDLER, R. M., CANTER, C. E., KALNES, T. N., LUPTON, F. S., KHOLIQOV, O., SHONNARD, D. R., BLOWERS, P.. **Evaluation of environmental impacts from microalgae cultivation in open-air raceway ponds: Analysis of the prior literature and investigation of wide variance in predicted impacts.** Alg Res, 1, 2012, p. 83–92.

HAREL, M., CLAYTON, D.. Feed formulation for terrestrial and aquatic animals. US Patent 20070082008 (WO/2004/080196), 2004.

HARUN, R., SINGH, M., FORDE, G. M., DANQUAH, M. K.. **Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products.** Renew Sust Energ Rev, 14, 2010, p. 1037–1047.

HEASMAN, M., DIEMAR, J., O'CONNOR, W.. SUSHAMES, T., FOULKES, L., NELL, J. A.. **Development of extended shelf-life microalgae concentrate diets harvested by centrifugation for bivalve molluscs – a summary. Special issue: Live feeds and microparticulate diets.** Aquaculture Res., 31, 8–9, 200, p. 637–659.

HISCHIER, R., ZAH, R., WÄGER, P., LEHMANN, M., GAUCH, M.. Life Cycle Assessment of Energy Products: Environmental Impact Assessment of Biofuels - Executive Summary (Assessment of Biofuels - Executive Summary (Okobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen - Schlussbericht - 2007.

HOU, J., ZHANG, P., YUAN, X., ZHENG, Y.. **Life cycle assessment of biodiesel from soybean, jatropha and microalgae in China conditions.** Renew Sust Energ Rev, 15, 2011, p. 5081-5091.

HUNG, M. T., LIU, J. C.. **Microfiltration for separation of green algae from water.** Colloids Surf B Biointerfaces v. 51, p.157–164, 2006.

IACOBESCU, R.I., KOUMPOURI, D., PONTIKES, Y., et al., 2011. Valorisation of electric arc furnace steel slag as raw material for low energy belite cements. J. Hazard. Mater. 196, 287–294.

INSTITUTO DO PVC. **A fabricação do PVC.** Instituto do PVC. Disponível em: <http://www.institutodopvc.org/publico/?a=conteudo&canal_id=39&subcanal_id=40>. Acesso em: 15 de fev. 2015.

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate change 2007:

synthesis report. 2007.

ISAIA, G. C.. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. Volume 1. São Paulo: IBRACON. 2005.

ITOIZ, E. S., FUENTES-GRÜNEWALD, C., GASOL, C. M., GRACÉS, E., ALACID, E., ROSSI, S., RIERADEVALL, J.. **Energy balance and environmental impact analysis of marine microalgal biomass production for biodiesel generation in a photobioreactor pilot plant.** Biomass Bioenerg, 39, 2012, p. 324-335.

JAEGER, K.E., REETZ, T.M. Microbial lipases from versatile tools for biotechnology. Trends Microbiol, v.16, p.396-403, 1998.

JANAUN, J. E N. ELLIS. Perspectives on biodiesel as a sustainable fuel. Renewable and Sustainable Energy Reviews, **14(4)**: 1312-1320. doi:10.1016/j.rser.2009.12.011. 2010.

JIANG, Z., MENG, D., MU, H., YOSHIKAWA, K.. **Study on the hydrothermal drying technology of sewage sludge.** SCIENCE CHINA Technological Sciences 53(1), 2010, p. 160-163.

JOLLIET, O., SAADE, M., CRETZAZ, P.. **Analyse du cycle de vie: Comprendre et réaliser un écobilan.** Lausanne: P.P. et U.R., 2005.

JORQUERA, O., KIPERSTOK, A., SALES, E. A., EMBIRUÇU, M., GHIRARDI, M. L.. **Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors.** Bioresource Technol, 101, 2010, p. 1406-1413.
Journal of Hydrogen Energy, v. 31, p. 1563-1573, 2006.

JUNGBLUTH, N., CHUDACOFF, M., DAURIAT, A., DINKEL, F., DOKA, G., EMMENEGGER, M. F., GNANSOUNOU, E., KLJUN, N., SPIELMANN, M.. Life Cycle Inventories of Bioenergy; Final report ecoinvent v2.0 No. 17; Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007.

KADAM, K. L.. **Microalgae production from power plant flue gas: environmental implications on life cycle basis.** National Renewable Energy Laboratory, 2001, NREL/TP-510-29417.

KHOO, H. H., SHARRATT, P. N., DAS, P., BALASUBRAMANIAN, R. K., NARACHARISSETTI, P. K., SHAIK, S.. **Life cycle energy and CO₂ analysis of microalgae-to-biodiesel: Preliminary results and comparisons.** Bioresource Technol, 102, 2011, p. 5800-5807.

KIM, D.G., LA, H.J., AHN, C.Y., PARK, Y.H., OH, H.M.. **Harvest of *Scenedesmus* sp. with bioflocculant and reuse of culture medium for subsequent high-density cultures.** Bior. Techn. v. 102, 2011, p. 3163-3168.

KIM, M. K. et al. Enhanced production of *Scenedesmus* spp. (green microalgae) using a new medium containing fermented swine wastewater. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 11, p. 2220-2228, Aug 2007. ISSN 0960-8524. Available at: <Go to ISI>://WOS:000245970500023>.

KISS, A. A., DIMIAN, A. C., ROTHENBERG, G.. **Biodiesel by catalytic reactive distillation powered by metal oxides.** Energy Fuel, 22(1), 2008, p. 598-604.

KNOTHE, G.; GERPEN, J. V.; KRAHL, J.; RAMOS, L. P.. Manual de Biodiesel. 1ª edição, Editora Edgard Blücher, 2006.

KNUCKEY, R., BROWN, M., ROBERT, R., FRAMPTON, D.. **Production of microalgal concentrates by flocculation and their assessment as aquaculture feeds.** Aquaculture Engineering, 35 (3) , 2006, p. 300–313.

KWON, H. et al. Harvesting of microalgae using flocculation combined with dissolved air flotation. Biotechnology and Bioprocess Engineering, v. 19, n. 1, p. 143-149, 2014.

LAM, M. K., LEE, K. T., MOHAMED, A. R.. **Current status and challenges on microalgae-based carbon capture.** Int J Greenh Gas Con, 10, 2012, p. 456–469.

LARDON, L., HÉLIAS A., SIALVE, B., STEYERS, J.P., BERNARD, O.. **Life-Cycle Assessment of Biodiesel Production from Microalgae.** Environ Sci Technol, 43, 2009, p. 6475-6481.

LEE, A. K.; LEWIS, D. M.; ASHMAN, P. J.. **Microbial flocculation, a potentially low-cost harvesting technique for marine microalgae for the production of biodiesel.** J Appl Phycol, v. 21, p. 559-567, 2009.

LEE, D.. **Algal biodiesel economy and competition among bio-fuels.** Bioresour Technol, 102(1), 2011, p. 43-49.

LEE, J. Y., YOO, C., JUN, J. S., AHN, C. Y., OH, H. M.. **Comparison of several methods for effective lipid extraction from microalgae.** Bioresource Technology 101(1, Supplement): 2010, p.75-77.

LEMOS, J. S.. **Desenvolvimento de sistema de tratamento e reciclagem de meio de cultivo de microalgas para produção de biodiesel.** 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

LI, Y., HORSMAN, M., WU, N., LAN, C. Q., DUBOIS-CALERO, N.. **Biocatalysts and bioreactor design, biofuels from microalgae.** Biotechnol Progr, 24, 2008, p. 815–820.

LIANG, Y., SARKANY, N., CUI, Y.. **Biomass and lipid productivities of Chlorella vulgaris under autotrophic, heterotrophic and mixotrophic growth conditions.** Biotechnol Lett, 31(7), 2009, p. 1043-1049.

LIU, X., CLARENS, A. F., COLOSI, L. M.. **Algae biodiesel has potential despite inconclusive results to date.** Bioresour. Technol, 104, 2012, p. 803–806.

LOURENÇO, S. O.. Cultivo de microalgas marinhas – princípios e aplicações. São Carlos: RiMa, 2006. ISBN 8576561131.

LU CHEN, C. W., WEIGUO, W. JIANG, W. E.. **Optimal conditions of different flocculation methods for harvesting *Scenedesmus* sp. cultivated in an open-pond system.** Bior. Tech., v. 133, 2013, p. 9–15.

MA, F., HANNA, M. A.. **Biodiesel production: a review.** Bioresource Technology, v.70, p.1-15, 1999.

MARZULLO, R.C.M. Análise da Ecoeficiência dos Óleos Vegetais Oriundos da Soja e da Palma, Visando a Produção de Biodiesel. Dissertação. Escola Politécnica, USP, São Paulo, SP, Brasil, 2007.

MARTINEZ, M. E.; SANCHEZ, S.; JIMENEZ, J. M.; YOUSFI, F. E.; MUNOZ, L.. **Nitrogen and phosphorus removal from urban wastewater by the microalgae *Scenedesmus obliquus*.** Bioresource Technology, v. 73, 2000, p. 263–272.

MARTINZ, D.; QUADROS, J. Compounding PVC with renewable materials. **Plastics, rubber and composites**, London, v. 37, p.459-469, set/out. 2008.

MATA, T. M., MARTINS, A. A., CAETANO, N. S.. **Microalgae for biodiesel production and other applications: a review.** Renew Sust Energ Rev, 14, 2010, p. 217–232.

MATSUNAGA, T. et al.. **Characterization of marine microalga, *Scenedesmus* sp. Strain JPCC GA0024 toward biofuel production.** Biotechnol Lett, v. 31, 2009, p.1367 – 1372.

MAYFIELD, S.. **Algal Model, National Renewable Energy Laboratory-Air Force Office of Scientific.** In: Workshop on Algal Oil for Jet Fuel Production. Anais. 2008.

MCGINN, P. J., DICKINSON, K. E.; BHATTI, S., FRIGON, J., GUIOT, S. R., O’LEARY, S. J. B.. **Integration of microalgae cultivation with industrial waste remediation for biofuel and bioenergy production: opportunities and limitations.** Photosynth. Res. n. 109, 2011, p. 231-247.

MCHUGH, D. J.. A guide to the seaweed industry. Rome, FAO. FAO Fisheries Technical Paper, 441, 2003.

MEHTA, P.K., 2002, “Greening of the concrete industry for sustainable development”, Concrete International, v. 24, n. 7, pp. 23-28.

MELIS A.; MATTHEW R. M. Integrated biological hydrogen production. International MENDES, N. C. **Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil.** 2013. 147p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

MENG, X., YANG, J., XU, X., ZHANG, L., NIE, Q., XIAN, M.. **Biodiesel production from oleaginous microorganisms.** Renewable Energy. China, 34, 2009, p. 1-5.

MIYAWAKI, B.. **Purificação de biogás através de cultivo de microalgas em resíduos Agroindustriais.** 137 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, 2014.

MOAZAMI, N., ASHORI, A., RANJBAR, R., TANGESTANI, M., EGHTESEADI, R., NEJAD, A. S.. **Large-scale biodiesel production using microalgae biomass of *Nannochloropsis***. Biomass Bioenergy, 39(0), 2012, p. 449-453.

MONTEIRO, Mário Francisco Giani. A carga da doença associada com algumas causas de internação hospitalar realizada pelo SUS. Epidemiol. Serv. Saúde, Brasília, v. 13, n. 1, mar. 2004.

MORCELLI, A. V.. **Estudo da eficiência de diferentes agentes coagulantes na sedimentação de microalgas cultivadas em fotobiorreatores**. 44 f. Trabalho de diplomação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

MUÑOZ, R., GUIEYSSE, B.. **Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review**. Water Research, v.40, 2006, p. 2799-2815.

MURTHY, Y.I., 2012. Stabilisation of expansive soil using mill scale. Int. J. Eng. Sci. Technol. 4, 629–632.

NPDEAS. Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável. Disponível em: <<http://npdeas.blogspot.com.br/>>. Acesso em: 10 de mar. 2014.

O'CONNELL, D., SAVELSKI, M., SLATER, C. S.. **Life cycle assessment of dewatering routes for algae derived biodiesel processes**. Clean Techn Environ Policy, 2012, p.1-11.

OLIVEIRA, A. C.. **Produção de biomassa de microalgas *Scenedesmus sp.* em efluente de bovinocultura biodigerido**. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

OMETTO, A. R. (2000). Discussão sobre os fatores ambientais impactados pelo setor sucroalcooleiro e a certificação socioambiental. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

OUSTADAKIS, P., TSAKIRIDIS, P.E., KATSIAPI, A., et al., 2010. Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD). Part I: Characterization and leaching by diluted sulphuric acid. J. Hazard. Mater. 179, 1–7.

PAPAZI, A., MAKRIDIS, P., DIVANACH, P.. **Harvesting *Chlorella minutissima* using cell coagulants**. J. Appl. Phycol. 22, 2010, p. 349–355.

PARDO, Y., SÁNCHEZ, E., KAFAROV, V.. **Life cycle assessment of third generation biofuels production**. Chem Eng Trans, 21, 2010, p. 1177-1182.

PARENTE, E. **Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado**. Tecbio, Fortaleza, CE, 65p, 2003.

PATIL, P. D., DENG, S.. **Optimization of biodiesel production from edible and non-edible vegetable oils**. Fuel, 88 (7), 2009, p.1302-1306.

PATIL, V., TRAN, K.Q., GISELROD, H. R.. **Towards sustainable production of biofuels from microalgae**. Int. J. Mol. Sci. 9, 2008, p. 1188–1195.

PE, LBP. PE International, Lehrstuhl für Bauphysik der Universität Stuttgart. GaBi 4 Software-System and Databases for Life Cycle Engineering. Copyright, TM. Stuttgart, Echterdingen, 2002.

PENNINGTON, D. W., POTTING, J., FINNVEDEN, G., LINDEIJER, E., JOLLIET, O., RYDBERG, T., REBITZER, G.. **Life cycle assessment part 2 - current impact assessment practice**. Environment International, v. 30, n. 5, 2004, p. 721-739.

PERKINS, E. G.. **Analysis of fats, oils and derivatives**. American Oil Chemists Illinois: Society Champaign, 1993. 664p.

PRAGYA, N., PANDEY, K. K., SAHOO, P. K.. **A review on harvesting, oil extraction and biofuels production technologies from microalgae**. Renew. Sustain. Energy Rev., 24, 2013, p. 159–171.

PRÉ CONSULTANTS, Introduction to LCA with SimaPro 7, versão 4.2, jun. 2007.

PRODUCT. **Life cycle management provides food for thought**. Food Technology International – journal article. p. 108-109, 2004.

PULZ, O. P.. **Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms**. Applied Microbiology and Biotechnology, 57(3), 2001, p.287-293.

PULZ, O., GROSS, W.. **Valuable products from biotechnology of microalgae**. Applied Microbiology and Biotechnology, v. 65, 2004, p. 635-648.

RAMALHO, F. M. P.. **Avaliação Ambiental do uso de Microalgas na Produção de Biodiesel: Revisão Bibliográfica Sistemática**. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia e Bioenergia. Universidade Nova de Lisboa. Portugal. 2013.

RAMOS, L. P., DOMINGOS, A. k., KUCEK, K. T., WILHELM, H. M.. **Biodiesel: um projeto de sustentabilidade econômica e socioambiental para o Brasil**. Biotecnologia, Ciência e Desenvolvimento, São Paulo, v. 31, 2003, p. 28-37.

RAMOS, L. P.; SILVA, F. R.; MANGRICH, A. S.; Cordeiro, C. S. Tecnologias de produção de biodiesel. *Rev. Virtual Quim.*, 2011, 3 (5), 385-405.

RAPPE C, KJELLER L-O, KULP S-E, DE WIT C, HASSELTEN I AND PALM O., Levels, profile and patterns of PCDDs and PCDFs in samples related to the production and use of chlorine. *Chemosphere*, 23(1991)1629-1636.

RAWAT, I. et al. Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. **Applied Energy**, v. 88, n. 10, p. 3411-3424, Oct 2011. ISSN 0306-2619. Available at: <ISI>://WOS:000292808400020>.

REBITZER, G. **Enhancing the Application Efficiency of Life Cycle Assessment for Industrial Uses**. Tese (Doutorado em Ciências) - Faculté Environment Naturel, Architectural et Construit, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2005. 219 p.

RECIPE 2008 – A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level. Holanda: Ruimte en Milieu,

Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 2012. 137p (Texto técnico).

REFINARIA ALBERTO PASQUALINI. Disponível em: <http://www.refap.com.br/hexano.asp>. Acesso em: 27 de abr. 2015.

RIÃÑO, B., MOLINUEVO, B., GARCÍA-GONZÁLEZ, M. C.. **Optimization of chitosan flocculation for microalgal-bacterial biomass harvesting via response surface methodology**. Ecol. Eng. v-38, 2012, p. 110-113.

RIBEIRO, R. L. L.; MARIANO, A. B.; DILAY, E.; SOUZA, J. A.; ORDONEZ, J. C.; VARGAS, J. V. C. **The temperature response of compact tubular microalgae photobioreactors**. Engenharia Térmica, v. 8, p. 50-55, 2009.

ROCHA, L. N.. **Estudo da concentração de biomassa de microalgas por filtração e floculação**. 96 f. Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Química, 2010.

RODOLFI, L., CHINI ZITELLA, G., BASSI, N., PADOVANI, G., BIONDE, N., BONINI, G.. **Microalgae for oil: strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor**. Biotechnol Bioeng, 102(1), 2008, p. 100-112.

RODRIGUES, S. L. C., MOREIRA, R. L. S., CARDOSO, M. H., MERÇON, F.. **Avaliação de parâmetros de ultrafiltração de suco de banana**. Ciência e Tecnologia de Alimentos, vol. 23(supl), p. 98-101, 2003.

RODRIGUES, L. D.. A cana-de-açúcar como Matéria-prima para a Produção de Biocombustíveis: Impactos Ambientais e o Zoneamento Agroecológico como Ferramenta para Mitigação. 2010. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Análise Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2010.

ROSENBERG, J. N., OYLER, G. A., WILKINSON, L., BETENBAUGH, M. J.. **A Green Light for Engineered Algae: Redirecting Metabolism to Fuel a Biotechnology Revolution**. Current Opinion in Biotechnology, 2008.

RUCHEL, M., LUSCOMBE D. Dioxin Hotspots – Known and potential sources of dioxin pollution in Australia. Greenpeace Australia, December 1998.

SAIC – Scientific Applications International Corporation (2006) Life Cycle Assessment: Principles and Practice. US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH. Report No.: EPA/600/R-06/060.

SAKUMA, A. C. Desenvolvimento e análise experimental de biodigestores modulares de baixo tempo de residência. Curitiba, 2013. 118f.

SÁNCHEZ, J. F., FERNÁNDEZ, J. M., ACIÉN, F. G., RUEDA, A., PÉREZ-PARRA, J., MOLINA, E. **Influence of culture conditions on the lutein content of the new strain *Scenedesmus almeriensis***. Proc Biochem; 43, 2008, p.398–405.

SÁNCHEZ-MARTÍN, J., BELTRÁN-HEREDIA, J., SOLERA-HERNÁNDEZ, C.. **Surface water and wastewater treatment using a new tannin-based coagulant. Pilot plant trials.** J. Env. Man., v-91, 2010, p. 2051-2058.

SANDER, K., MURPHY, G.. **Life cycle analysis of algae biodiesel.** The International Journal of Life Cycle Assessment. Vol. 15, nº7, 2010, p. 704-714.

SATYANARAYANA, K. G., MARIANO, A. B., VARGAS, J. V. C.. **A review on microalgae, a versatile source for sustainable energy and materials.** International Journal of Energy Research 35, 2011, p. 291–311.

SCENEDESMUS. Disponível em:
<<http://protist.i.hosei.ac.jp/pdb/images/chlorophyta/scenedesmus/index.html>>. Acesso em: 06 de jun. 2014.

SCHENK, P. M., THOMAS-HALL, S. R., STEPHENS, E., MARX, U. C., MUSSGUNG, J. H., POSTEN, C., KRUSE, O., HANKAMER, B.. **Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production.** Bioenerg. Res. vol.1, 2008, p. 20-43.

SCOTT, S. A., DAVEY, M. P., DENNIS, J. S., HORST, I., HOWE, C. J., LEA-SMITH, D. J.. **Biodiesel from algae: challenges and prospects.** Current opinion in biotechnology. Elsevier Ltd, 21(3), 2010, p. 277- 286.

SELESU, N. F. H., ALVES, G. C., OLIVEIRA, T. V., CÔRREA, D. O., MIYAWAKI, B., MARIANO, A. B., VARGAS, J. V. C., VIEIRA, B. R.. **Harvest of Scenedesmus sp. cultivated in a tubular photobioreactor treating swine wastewater effluent using a tannin-based flocculant: a pilot scale microalgae production plant.** Chemical Engineering Journal, 2014, (Não publicado).

SHELEF, G., SUKENIK, A., GRENN, M.. **Microalgae Harvesting and Processing: A Literature Review.** Subcontract Report, U.S. Department of Energy, 1984.

SHI, J., PODOLA, B., MELKONIAN, M.. **Removal of nitrogen and phosphorus from wastewater using microalgae immobilized on twin layers: an experimental study.** J Appl Phycol, 19, 2007, p. 417–423.

SHIRVANI, T., YAN, X., INDERWILDI, O. R., EDWARDS, P. P., King, D. A.. **Life cycle energy and greenhouse gas analysis for algae-derived biodiesel.** Energ Environ Sci, 4, 2011, p. 3773-3778.

SILVA, S. S. Avaliação do ciclo de vida do etanol: uma análise econômica, social e ambiental. Dissertação (Mestrado). 129f. Universidade Estadual de Londrina, 2012.

SILVA, A. G., CARTER, R., MERSS, F. L. M., CORRÊA, D. O., VARGAS, J.V.C., MARIANO, A. B., ORDONEZ, J. C., SCHERER, M. D.. **Life cycle assessment of biomass production in microalgae compact photobioreactors.** Global Change Biology Bioenergy, 2013. Disponível online. DOI: 10.1111/gcbb.12120.

SILVA, D. A.. **Produção de biomassa de microalgas cultivadas em esgoto sanitário biodigerido visando a produção de biodiesel.** 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de

Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SINGH, A., OLSEN, S. I.. **A critical review of biochemical conversion, sustainability and life cycle assessment of algal biofuels.** Appl. Energ. 88, 2011, p. 3548–3555.

SINGH, J., GU, S.. **Commercialization potential of microalgae for biofuels production.** Renewable Sustainable Energy Reviews, v. 14, 2010, p. 2596-2610.

SIRIN, S., CLAVERO, E., SALVADÓ, J.. **Métodos de pré-concentração potencial para *Nannochloropsis Gaditana* e um estudo comparativo das propriedades de amostras pré-concentradas.** Bioresour. Technol., 132, 2013, p. 293-304.

SORATANA, K., BARR, W.J., LANDIS, A. E.. **Effects of co-products on the life-cycle impacts of microalgal biodiesel.** Bioresource Technology 159, 2014, p. 157–166.

SORATANA, K., LANDIS, A. E.. **Evaluating industrial symbiosis and algae cultivation from a life cycle perspective.** Bioresource Technol, 102, 2011, p. 6892-6901.

SPOLAORE, P., JOANNIS-CASSAN, C., DURAN, E.; ISAMBERT, A.. **Optimization of *Nannochloropsis oculata* growth using the response surface method.** Journal of Chemical Technology and Biotechnology, France, 81, 2006, p. 1049–1056.

STEPHENSON, A. L., KAZAMIA, E., DENNIS, J. S., HOWE, C. J., SCOOT, S. A., SMITH, A. G.. **Life-cycle assessment of potential algal biodiesel production in the United Kingdom: a comparison of raceways and air-lift tubular bioreactors.** Energ Fuel, 24(7), 2010, p. 4062–4077.

STURM, B. S. M., LAMER, S. L.. **An energy evaluation of coupling nutrient removal from wastewater with algal biomass production.** Applied Energy 88(10), 2011, p. 3499-3506.

SUDHAKAR, K., PREMALATHA, M., SUDHARSHAN, K.. **Energy Balance and Exergy analysis of large scale algal biomass production.** In 2012 The 2nd Korea - Indonesia Workshop & International Symposium on Bioenergy from Biomass, 2012, p. 66-69.

TAHER, D. M.. **Biodiesel de microalgas cultivadas em dejetos suíno biodigeridos.** 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

TECHNOLOGY. Disponível em: <<http://www.technology.am/mit-algae-photobioreactor-112420.html>>. Acesso em: 20 de set. 2013.

TERRY, K. L., RAYMONT, L. P.. **System design for the autotrophic production of microalgae.** Enzyme Microb Technol v.7, 1985, p. 474-87.

TREDICI, M.. Mass production of microalgae: photobioreactors. In **RICHMOND, A. Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology.** England: Blackwell Publishing, 2004, p. 178-214.

UDUMAN, N., QI, Y., DANQUAK, M. K.. **Marine microalgae flocculation and focused beam reflectance measurement.** Chem. Eng. J., v. 162, 2010, p. 935–940.

UGWU, C. U., AOYAGI, H., UCHIYAMA, H.. **Photobioreactors for mass cultivation of algae.** Bioresource Technology. Japan, 99, 2008, p. 4021–4028.

UMADEVI, T., BRAHMACHARYULU, A., KARTHIK, P., et al., 2012. Recycling of steel plant mill scale via iron ore sintering plant. Ironmaking Steelmaking 39, 222–227.

UNITED KINGDOM ENVIRONMENT AGENCY. Regulation of Dioxin Releases from the Runcorn operations of ICI and EVC, Information report. United Kingdom Environment Agency, January 1997.

USEPA. Environmental Protection Agency and Science Applications International Corporation LCA, 2001. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/lcaccess/lca101.htm>>. Acesso em: 23 de fev. 2014.

USIQUIMICA DO BRASIL LTDA. Ficha de Informação e Segurança de Produto Químico. Disponível em: <http://www.usiquimica.com.br/adm_img/fispq-5.pdf>. Acesso em: 03 de abr. 2015.

VALE, A., PAIVA, V.. **Avaliação do ciclo de vida de embalagens de 33 cl para néctares. Projeto de investigação de Engenharia Química, faculdade de engenharia do Porto,** 2003.

VARGAS, J. V. C., Projeto CNPq 552867/2007-1 - Ed 39/2007 Etanol/Biodiesel - Núcleo de pesquisa e desenvolvimento de energia auto-sustentável a partir do biodiesel e outras fontes.

VARGAS, J. V. C.; BALMANT, W.; STALL, A.; MARIANO, A. B.; ORDONEZ, J. C.; HOVSAPIAN, R.; DILAY, E. Patent Number(s): US2012088296-A1; WO2012050608-A1 - Photo-bioreactor for growing algae e.g. microalgae within nutrient medium, comprises support frame, horizontal bioreactor tubes, gassing/degassing housings, pH sensor, temperature sensor, and pump for circulating nutrient medium. 2012, Estados Unidos. VARGAS, J. V. C.; BALMANT, W.; STALL, A.; MARIANO, A. B.; ORDONEZ, J. C.; HOVSAPIAN, Z.; DILAY, E. Photobioreactor System. US2012088296-A1/WO2012050608-A1, 12 out. 2011, 12 abr, 2012.

VASUMATHI, K.K.; PREMALATHA, M.; SUBRAMANIAN, P. Parameters influencing the design of photobioreactor for the growth of microalgae. Renewable and Sustainable Energy Reviews. v. 16, p. 5443-5450, 2012

VERGA REI, P. A. G.. **Procedimentos laboratoriais para o controle da qualidade do Biodiesel.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Instituto Superior Técnico. Universidade técnica de Lisboa, Lisboa, Setembro. 2007.

VLADISAVLJEVIC, G. T., VUKOSAVLJEVIC, P., BUKVIC, B.. **Permeate flux and fouling in ultrafiltration of depectinized Apple juice using ceramic membranes.** Journal of Food Engineering, vol. 60, p. 241-247, 2003.

WANG, B., LI, Y.; WU, N., LAN, C. Q.. **CO₂ bio-mitigation using microalgae.** Applied

Microbiology and Biotechnology. Germany, 79, 2008, p. 707–718.

WIBUL, P., MALAKUL, P., PAVASANT, P., KANGVANSACHOOL, K., PAPONG, S.. **Life cycle assessment of biodiesel production from microalgae in Thailand: energy efficiency and global warming impact reduction.** Chem Eng Trans, 29, 2012, p. 1183-1188.

WU, Z., HUANG, W., ZHANG, C., LI, T., ZHANG, Y., LI, A.. **Evaluation of flocculation induced by pH increase for harvesting microalgae and reuse of flocculated medium.** Bior. Tech., v.110, 2012, p. 496-502.

XU, L., BRILMAN, D. W. F., WITHAG, J. A. M., BREM, G., KERSTEN, S.. **Assessment of a dry and a wet route for the production of biofuels from microalgae: energy balance analysis.** Bioresour Technol, 102 (8), 2011, p. 5113–5122.

YANFEN, L., ZEHAO, H., XIAOQUAN, M.. **Energy analysis and environmental impacts of microalgal biodiesel in China.** Energ Policy, 45, 2012, p. 142–151.

YANG, J., XU, M., ZHANG, X., HU, G., SOMMERFELD, M., CHEN, Y.. **Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: Water footprint and nutrients balance.** Biores Technol, 102(11), 2011, p. 159–165.

YUAN, J. S., TILLER, K. H., AL-AHMAD, H., STEWART, N. R., STEWART JR, C. N.. **Plants to power: bioenergy to fuel the future.** Trends Plant Sci, 13, 2008, p. 421–429.

ZARDO, I.. **Análise de viabilidade econômica da produção de biodiesel a partir de microalgas.** Trabalho de Diplomação em Engenharia Química. 42 f. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, 2011.

ZIMMERMAN, J. B., BRENTNER, L. B., ECKELMAN, M. J.. **Combinatorial Life Cycle Assessment to Inform Process Design of Industrial Production of Algal Biodiesel.** Environ Sci Technol, 45, 2011, p. 7060–7067.

APÊNDICES

Apêndice A. Processos utilizados na montagem dos sistemas de cultivo obtidos a partir Ecoinvent v 2.2

Nome do processo	Nome do processo no banco de dados Ecoinvent (Fevereiro/2015)
Montagem da lagoa aberta	<ul style="list-style-type: none"> - PVC film E - Steel hot rolled section, blast furnace and electric arc - furnace route, production mix, at plant GLO S - Packaging, corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant/CH U - Polyethylene high density granulate (PE-HD), production mix, at plant RER - Silicone product, at plant/RER U - Transport, lorry >16t, fleet average/RER U
Montagem do FBR	<ul style="list-style-type: none"> - Glass fibre, at plant/RER U - Steel, low-alloyed, at plant/RER U - Transport, lorry >28t, fleet average/CH U - Cement, unspecified, at plant/CH U - Glass fibre, at plant/RER U - PVC pipe E - PVC film E - Alkyd paint, white, 60% in H₂O, at plant/RER U - Crushed stone 16/32, open pit mining, production mix, at plant, undried RER S - Steel rebar, blast furnace and electric arc furnace route, production mix, at plant GLO S - Kraft paper, unbleached, at plant/RER U - Silicone product, at plant/RER U

Apêndice B - Processos utilizados no estudo do ciclo de vida do cultivo das microalgas obtidos a partir Ecoinvent v 2.2.

Nome do processo	Nome do processo no banco de dados Ecoinvent (Fevereiro/2015)
Cultivo das microalgas com nutrientes sintético	<ul style="list-style-type: none"> - Sodium chloride, powder, at plant/RER U - Boric acid, anhydrous, powder, at plant/RER U - Magnesium sulphate, at plant/RER U - Potassium hydroxide, at regional storage/RER U - EDTA, ethylenediaminetetraacetic acid, at plant/RER U - Zinc, primary, at regional storage/RER U - Nitrogen fertilizer, production mix, at plant/US - Phosphorous fertilizer, production mix, at plant/US - Iron sulphate, at plant/RER U - Calcium chloride, CaCl₂, at regional storage/CH U - Transport, lorry >16t, fleet average/RER U - Electricity, low voltage, production BR, at grid/BR U - Water, fresh - Carbon dioxide
Cultivo das microalgas com nutrientes alternativo	<ul style="list-style-type: none"> - Electricity, low voltage, production BR, at grid/BR U - Carbon dioxide - Water, fresh

Apêndice C - Processos utilizados no estudo do ciclo de vida da recuperação da biomassa microalgal obtidos a partir Ecoinvent v 2.2.

Nome do processo	Nome do processo no banco de dados Ecoinvent (Fevereiro/2015)
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	- Aluminium sulphate, powder, at plant/RER U
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	- Carbon dioxide
FeCl_3	- Lime, hydrated, packed, at plant/CH U
NaOH	- Iron sulphate, at plant/RER U
Floculação	- Sodium hydroxide (concentrated) E
Filtragem simples	- Electricity, low voltage, production BR, at grid/BR U
Centrifugação	- Textile, woven cotton, at plant/GLO U
Secagem Térmica	- Electricity, low voltage, production BR, at grid/BR U
	- Electricity, low voltage, production BR, at grid/BR U

Apêndice D – Processos utilizados no estudo do ciclo de vida da extração dos ácidos graxos obtidos a partir Ecoinvent v 2.2.

Nome do processo	Nome do processo no banco de dados Ecoinvent (Fevereiro/2015)
Extração a quente	Sulphuric acid, liquid, at plant/RER U Electricity, low voltage, production BR, at grid/BR U
Saponificação	Acetic acid, 98% in H ₂ O, at plant/RER U Sodium hydroxide (concentrated) E Methanol, at plant/GLO U Acetic acid, 98% in H ₂ O, at plant/RER U Electricity, low voltage, production BR, at grid/BR U

Apêndice E – Processos utilizados no estudo do ciclo de vida da esterificação enzimática obtidos a partir Ecoinvent v 2.2.

Nome do processo	Nome do processo no banco de dados Ecoinvent (Fevereiro/2015)
Esterificação enzimática	Methanol, at plant/GLO U
	Bauxite, at mine/GLO U
	Ethanol, 95% in H ₂ O, from sugar cane, at fermentation plant/BR U
	Electricity, low voltage, production BR, at grid/BR U

ANEXO

DESCRIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO GRUPO DE PESQUISA GECT / NPDEAS

O NPDEAS (<http://www.npdeas.blogspot.com.br/>), Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável, da UFPR foi implantado em 2008 e é constituído por professores das Áreas de Engenharia, Química e Bioquímica. O NPDEAS faz parte do Grupo de Energia e Ciências Térmicas coordenado pelo proponente desta proposta. Os trabalhos desenvolvidos no NPDEAS enfocam problemas científicos e tecnológicos cuja principal característica é o forte vínculo com as necessidades do setor produtivo. Um exemplo disso são contratos de prestação de serviço estabelecidos entre as empresas Nilko Metalurgia Ltda. e a PSA - Peugeot Citroën do Brasil. Além disso, o grupo teve 4 projetos aprovados no CNPq. Neste curto espaço de tempo, o NPDEAS estabeleceu-se como referência no desenvolvimento de fotobiorreatores para produção de biomassa de microalgas. Atualmente são três fotobiorreatores tubulares em escala industrial construídos (10 m³ cada - Fig. 2C). No total, já foram produzidas 13 dissertações de mestrado, 2 teses de doutorado, 7 artigos em periódicos, 3 patentes e mais de 50 trabalhos completos em anais de congressos.

Além de possuir 4 fotobiorreatores em escala piloto instalados no pátio do NPDEAS, nosso grupo possui um biodigestor modular de fluxo ascendente responsável pelo tratamento de resíduos agroindustriais e esgoto sanitário cujo efluente é usado como meio de cultivo para as microalgas em fotobiorreatores e o biogás utilizado para purificação e aumento do poder calorífico em processo de fixação biológica de CO₂ com microalgas.

Disponibilidade Efetiva de apoio técnico: Além dos professores (5), complementam a equipe de pesquisa do NPDEAS 2 técnicos, 7 alunos de mestrado, 5 alunos de doutorado, 2 engenheiros, 7 alunos de graduação (iniciação científica), 10 alunos do ensino técnico, uma secretária e uma auxiliar de serviços gerais, totalizando 40 pessoas.

1. DISPONIBILIDADE DE INFRAESTRUTURA EFETIVA:

A seguir será descrito a infraestrutura física e competências de cada unidade do NPDEAS.

1.1. Grupo de Energia e Ciências Térmicas - GECT ([LINK](#))

Composto por pesquisadores da área de energia, mecânica dos fluidos, termodinâmica e fenômenos de transporte, o grupo de energia e ciências térmicas atua no campus da UFPR (Centro Politécnico), desde 1996.

Desde sua criação o grupo vem desenvolvendo pesquisa científica e consultoria nas áreas de Engenharia Térmica, Termodinâmica, Engenharia Biomédica e Fenômenos de Transporte. Particularmente o grupo tem desenvolvido a ferramenta de simulação numérica com ajuste e validação de resultados através de medições experimentais, para projeto, otimização e desenvolvimento de novos produtos.

As atividades de pesquisa são desenvolvidas em quatro laboratórios. No LMH (Lab. de Máquinas Hidráulicas), onde estão montados diversos experimentos atualmente em desenvolvimento, enquanto que o processamento dos dados, assim como as atividades de simulação numérica são desenvolvidos no LFT (Lab. de Fenômenos de Transporte). No Laboratório de Células de Combustível (LaCelC) onde são realizadas pesquisas no desenvolvimento de novas células de combustível de membrana alcalina e eletrodos livre de platina, bem como são estudados processos alternativos de geração de hidrogênio.

O GECT possui as seguintes linhas de pesquisa:

- i. Energia Sustentável ([LINK](#))
- ii. Engenharia do Petróleo e Gás Natural
- iii. Engenharia Térmica
- iv. Refrigeração
- v. Resfriamento de equipamentos eletrônicos
- vi. Transferência de Calor em Engenharia Biomédica

1.2.1. Laboratório de Fenômenos de Transporte e Laboratório de Células de Combustível – Departamento de Engenharia Mecânica – UFPR (<http://demec.ufpr.br/laboratorios/lft/gect/>)

Coordenador: Professor José Viriato Coelho Vargas

O Laboratório de Fenômenos de Transporte e o Laboratório de Células de Combustível possuem infraestrutura contendo computadores, recursos multimídia, instrumentação, equipamentos especializados e sala de aula

1.2.2. Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável (NPDEAS - UFPR)

Gerente de Programas: Prof. André B. Mariano

As instalações do NPDEAS (<http://goo.gl/htdZg>) ocupam um área de 800 m², onde estão abrigados: Laboratório de Biotecnologia, Laboratório de Precisão, Sala de Cultivo de Bactérias e Fungos, Sala de Cultivo de Microalgas, Almoxarifado, Laboratório de Operações Unitárias, Laboratório de Química Pesada, Casa de Máquinas, Unidade Produtora de Vapor, Secretaria, Sala dos Alunos, Sala da Engenharia, Sala da Química, Sala da Biotecnologia, Biodigestor, Sala da Gerência, Sala de Professor Visitante, Pátio com os fotobiorreatores. As instalações do NPDEAS abrigam ainda uma Sala de Simulação utilizada para aulas, reuniões, treinamentos e modelagem matemática. Parte da infraestrutura pode ser observada nas Fig 4 - 5.



Fig. 1. Infraestrutura do NPDEAS: (A) Sala de Equipamentos: GC, HPLC, Espectrofotômetro e Balanças (B) Unidade de Biotecnologia - uma visão geral.



Fig. 2. Visão Geral do NPDEAS: Fotobiorreatores em escala industrial, sala de cultivo e visão frontal.

1.3. Unidade de Produção de Biodiesel e Operações Unitárias do NPDEAS

Coordenador: Professor Luiz Pereira Ramos

(<http://www.quimica.ufpr.br/lramos/>)

Laboratório de Produção de ésteres alquílicos a partir de matérias graxas de origem variada para emprego como biodiesel ou como insumo para a indústria química.

Competência: O Laboratório do Professor Luiz Pereira Ramos possui estrutura para produzir 200 L de biodiesel a partir do óleo isolado de microalgas a ser produzido no NPDEAS em fotobiorreatores compactos, conforme mostra a Fig. 6. As linhas de pesquisa do Prof. Luiz Ramos apresentam abordagens inovadoras para produção de biodiesel utilizando transesterificação química *in situ* e também a ‘extração-transesterificação simultânea’ ainda não aplicado ao óleo de microalgas. O laboratório dispõe de reatores em escala laboratorial equipados com ultrassom e micro-ondas, disponíveis para utilização nas sínteses de biodiesel.



Fig. 3. Unidade de Biodiesel (reator de explosão a vapor e reator reator de biodiesel por transesterificação em escala piloto).

1.4. Grupo de Enzimologia e Biotecnologia

Coordenadores: Professor David Alexander Mitchell, Professora Nádia Krieger

Linhas de Pesquisa: Aproveitamento de resíduos agroindustriais por fermentação em estado sólido (FES). Desenvolvimento e otimização de processos de FES para obtenção de produtos biotecnológicos. Morfologia, fisiologia e cinética de crescimento de microrganismos, especialmente fungos filamentosos, no ambiente fornecido pelo meio sólido.

Competência: O Grupo de Enzimologia e Biotecnologia está responsável pela elaboração dos experimentos necessários para o aprimoramento do processo de modo a obter-se biomassa em quantidade e qualidade necessária para a produção de biodiesel. Serão avaliados os efeitos das concentrações de nutrientes (Nitrogênio, Ferro, Fosfato, etc.) na produção de lipídeos em diferentes linhagens de microalgas em função dos parâmetros dos fotobiorreatores (volume, fluxo, temperatura, injeção de CO₂, geometria dos tubos transparentes, entre outros). Os laboratórios do Grupo de Enzimologia e Biotecnologia estarão disponíveis para a realização de análises (contagem de células, quantificação da biomassa, produção de lipídeos).

Toda a experiência nesta área e a infraestrutura dos laboratórios estão disponíveis para a análise dos da biomassa e do óleo de microalga produzida nos fotobiorreatores (GC-MS, RMN, Eletrospray MS, HPLC).

Tabela 1. Principais produções científicas e tecnológicas desenvolvidas pelo NPDEAS de 2008 a 2015.

PATENTES	
TAKAMATSU, AA; SAKUMA, AC SCHROEDER, L ; SPRUNG, CL MIKAMI, WR; SOUZA, GR DE MORAES, EG; D'AQUINO, CA; SILVA, RAF; MARIANO, AB; PRADO, MR; PASCOALOTTO, G	Sistema biológico automatizado para eliminação do odor das emissões gasosas de atividades comerciais poluidoras - PI 1003452-8 A2 2010, Brasil Patente: Modelo de Utilidade Número do registro: PI10034528, data de depósito: 13/09/2010, título: "Sistema biológico automatizado para eliminação do odor das emissões gasosas de atividades comerciais poluidoras - PI 1003452-8 A2"
VARGAS JVC; BALMANT, W; MARIANOAB; ORDONEZ, JC; HOVSAPIAN, R; DILAY, E	Photobioreactor System (Depósito nos Estados Unidos da América) US2012088296-A1 / WO2012050608-A1
MIYAWAKI B; VARGAS, JVC; MARIANO, AB; CORRÊA, DO; SANTOS, B; SAKUMA, AC; SELESU, N; PEIXOTO, PHR; SILVA, DA; TAHER, DM; DILAY, E	Fotobiorreator tubular para tratamento integrado de efluentes líquidos e emissões INPI BR 10 2013 0263958 Data do depósito 14/10/2013
ARTIGOS	
SILVA, ANGELA G CARTER, RICHARD MERSS, FELIPE L M CORRÊA, DIEGO O VARGAS, JOSE V C MARIANO, ANDRÉ B ORDONEZ, JUAN C SCHERER, MARISA D	Life cycle assessment of biomass production in microalgae compact photobioreactors Global Change Biology Bioenergy, v 7, p 184-194, 2015
DILAY, E VARGAS, J V C SOUZA, J A ORDONEZ, J C YANG, S MARIANO, A B	A volume element model (VEM) for energy systems engineering International Journal of Energy Research (Print), v 39, p 46-74, 2015
OLIVEIRA, ACD RODRIGUES, MLF; MARIANO, AB	Production and characterization of an extracellular lipase from <i>Candida guilliermondii</i> Brazilian Journal of Microbiology (Impresso), v 45, p 1503-1511, 2014
VARGAS, JVC; MARIANO, AB; CORRÊA, DO; ORDONEZ, JC	The microalgae derived hydrogen process in compact photobioreactors International Journal of Hydrogen Energy, v 39, p 9588-9598, 2014
Santos, K. R. ; MARIANO, ANDRÉ B	Determination of optimal algae concentration for continuous growth of <i>Scenedesmus</i> sp. in CHU and modified CHU media. Engenharia Térmica, v. 13, p. 52-58, 2014.
BALMANT, W; OLIVEIRA, BH; MITCHELL, DA; VARGAS, JVC; ORDONEZ, JC	Optimal operating conditions for maximum biogas production in anaerobic bioreactors Applied Thermal Engineering, v 62, p 197-206, 2014
RIBEIRO, RLL; MARIANO, AB; SOUZA, JA; VARGAS, JVC	Transient modeling and simulation of compact photobioreactor Engenharia Térmica, V 7, p 66-71, 2008
TORRENS, J; VARGAS, JVC; TELLES, EC; MARIANO, AB; ORDONEZ, JC	Biodiesel from microalgae: the effect of fuel properties on pollutant emissions Engenharia Térmica, v 7, p 35-43, 2008
MORAIS, KCC; RIBEIRO, RLL; SANTOS, KR; TAHER, DM; MARIANO, AB; VARGAS, JVC	<i>Phaeodactylum tricornutum</i> microalga growth rate in heterotrophic and mixotrophic conditions Engenharia Térmica, V 8, p 84-89, 2009
RIBEIRO, RLL; MARIANO, AB; DILAY, E; SOUZA, JA; ORDONEZ, JC; VARGAS, JVC	The temperature response of compact tubular microalgae photobioreactors Engenharia Térmica, v 8, p 50-55, 2009
CARVALHO JÚNIOR, RM; VARGAS, JVC; RAMOS, LP; MARINO, CEB; TORRENS, JCL	Microalgae biodiesel via in situ methanolysis Journal of Chemical Technology and Biotechnology, v 86, p 1418-1427, 211
SATYANARAYANA, KG; MARIANO, AB; VARGAS, JVC	A review on microalgae, a versatile source for sustainable energy and materials international Journal of Energy Research, v 35, p 291-311, 2011
D'AQUINO, CA; MUNARO, M; BALMANT, W; VARGAS, JVC; AMICO, SC; RIBEIRO, RLL	A simplified mathematical model to predict PVC photodegradation in photobioreactors Polymers Testing; V 31, p 638-344, 2012
OLIVEIRA, ACD; WATANABE, FMF; VARGAS, JVC; MARIANO, AB; RODRIGUES, MLF	Comparação entre três bioprocessos para a produção de enzimas proteolíticas utilizando resíduos agroindustriais, Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial, v 6 p 822-831, 2012
OLIVEIRA, ACD; MARIANO, AB; WATANABE, FMF; VARGAS, JVC; RODRIGUES, MLF	Production of methyl oleate with a lipase from an endophytic yeast isolated from castor leaves Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, v 1, p 295-300, 2012
OLIVEIRA, ACD; WATANABE, FMF; RODRIGUES, MLF; VARGAS, JVC; MARIANO, AB	Utilização de resíduos agroindustriais para a produção de enzimas lipolíticas por fermentação submersa Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v 15, p 19-26, 2013
OLIVEIRA, ACD; WATANABE, JVC;	Lipase production by endophytic yeast through factorial design Academia Journal of

RODRIGUES, MLF; VARGAS, JVC; MARIANO, AB	Microbiology Research, v 1, p 16-21, 2013
SILVA, AG; CARTER, R; MERSS, FLM; CORREA, DO; VARGAS, JVC; MARIANO, AB; ORDONEZ, JC; SCHERER, MD	Life cycle assessment of biomass production in microalgae compact photobioreactors (aceito para publicação) Global Change Biology Bioenergy, 2013 (aceito para publicação)
SUGAI-GUERRIOS, MH; MARIANO, AB; VARGAS, JVC; JUZ JUNIOR, LFL; MITCHELL, DA	Mathematical model of the CO ₂ solubilization reaction rates developed for the study of photobioreactors Canadian Journal of Chemical Engineering, 2013 (aceito para publicação)
CAPÍTULO DE LIVRO	
SOARES, D; MARIANO, AB; BECKER, AG; VARGAS, JVC; LUZ JUNIOR, LFL; NOSEDA, MD; MITCHELL, DA	Metodologias para obtenção de biomassa e extração de lipídeos de microalgas marinhas In: Pereira, T C G (Copel - Paraná) Dossiê de Pesquisa Fontes Renováveis de Energia 1 ed Curitiba; Via Laser Gráfica e Editora, 2010, p 147-159

Tabela 2- Trabalhos em andamento no NPDEAS

8 DISSERTAÇÕES DE MESTRADO EM ANDAMENTO	
Diego de Oliveira Corrêa	Desenvolvimento e caracterização do cultivo de microalgas em fotobiorreator alimentado por emissões gasosas industriais e de motores Início 2013 Dissertação de Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - UFPR, Orientador: José Viriato Coelho Vargas, Co-orientador: André B Mariano
Nelson Fernando Herculano Selesu	Investigação do cultivo de microalgas em fotobiorreator compacto em escala piloto em meio de efluentes animais biodigeridos Início: 2013 Dissertação de Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - UFPR, Orientador: José Viriato Coelho Vargas, Co-orientador: André B Mariano
Débora Meridiane Kochepka	Aplicação de ultrassom na conversão de óleo de microalgas em ésteres graxos Início: 2013 Dissertação (Mestrado em Química) - UFPR, Orientador: Luiz Pereira Ramos
Marcus Brandalize	Extração e esterificação de óleo de microalgas em fluidos pressurizados Início: 2013 Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - UFPR, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis Co-orientador: Luiz Pereira Ramos
Kassiana Ribeiro dos Santos	OPERAÇÃO DE FOTOBIORRETORES EM MODO CONTÍNUO Início: 2013 Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - UFPR, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Orientador: André Bellin Mariano
Beatriz Santos	Cultivo Mixotrófico de Microalgas Início: 2013 Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - UFPR, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Orientador: André Bellin Mariano
Roberto Nobuyoshi Yamada Júnior	DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO DE 10 TR. Início: 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais, Orientador: José Viriato Coelho Vargas
Paola Thalissa Bartoski Polla	Modelagem matemática e desenvolvimento de protótipo de pilha de combustível de membrana alcalina. Início: 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais).
8 TESES DE DOUTORADO EM ANDAMENTO	
Marisa Daniele Scherer	Avaliação do ciclo de vida (ACV) da produção de biodiesel de microalgas cultivadas em fotobiorreatores compactos industriais Início 2011 Tese de Doutorado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - UFPR, Orientador: Prof José Viriato Coelho Vargas, Co-orientador: André B Mariano
Anne Caroline Defranceschi Oliveira	Síntese e controle de qualidade de biodiesel de microalgas obtido via catálise enzimática. Início: 2014. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Orientador: André Bellin Mariano
Camila Agner D'Aquino	Desenvolvimento de método de recuperação de metano do meio líquido em reatores anaeróbios. Início: 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Orientador: José Viriato Coelho Vargas
Marcus Vinícius Alves Pereira	Modelagem, simulação e otimização de trocadores de calor de tubos elípticos aletados em regime turbulento. Início: 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Orientador: José Viriato Coelho Vargas
Fernando Gallego Dias	Modelagem, ajuste e validação experimental de processo de geração de hidrogênio via cultivo de microalgas em fotobiorreatores compactos. Início: 2014. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Orientador: José Viriato Coelho Vargas
Tallita Karolline Nunes	Modelagem, simulação e otimização de sistemas de refrigeração inteligentes. Início: 2011. Tese (Doutorado em Programa de Pós Graduação Em Eng Mecânica). Orientador: José Viriato Coelho Vargas.
Celso Luiz Buiar	Modelagem, simulação e otimização de cabos supercondutores de corrente contínua (DC). Início: 2011. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Orientador: José Viriato Coelho Vargas
Keli Cristiane Correia Morais	Análise e diagnóstico de câncer de mama a partir de imagem infravermelha. Início: 2011. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Orientador: José Viriato Coelho Vargas

Tabela 3 Trabalhos concluídos desenvolvidos pelo NPDEAS

27 DISSERTAÇÕES E TESES CONCLUÍDAS	
Carlos Fernando Pinnola. Desenvolvimento e implementação de kit inteligente para sistemas de refrigeração, aquecimento, ventilação e ar condicionado. 2013. Dissertação (Mestrado em Programa de Pós Graduação Em Engenharia Mecânica) - UFPR, . Orientador: Jose Viriato Coelho Vargas.	
Anderson Cardoso Sakuma. Desenvolvimento e análise experimental de biodigestores modulares de baixo tempo de residência. 2013. Dissertação (Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia) - UFPR, . Orientador: Jose Viriato Coelho Vargas.	
Emerson Dilay Desenvolvimento e otimização termodinâmica de fotobiorreatores compactos para aquicultura de microalgas Início: 2010 Tese de Doutorado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - UFPR, Orientador: Prof José Viriato Coelho	

-
- Vargas, Co-orientador: André B Mariano
-
- Robert Luis Lara Ribeiro **Modelagem matemática e simulação de fotobiorreatores tubulares compactos para cultivo de microalgas** Início: 2010 Tese de Doutorado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - UFPR, Orientador: Prof José Viriato Coelho Vargas, Co-orientador: André B Mariano
-
- Luciana Cristina dos Santos Martinho. **Modelagem, simulação e otimização de refrigeradores de absorção.** 2013. Tese (Doutorado em Programa de Pós-Graduação Em Eng Mecânica) - UFPR, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Orientador: Jose Viriato Coelho Vargas.
-
- Gladi Aparecida Galindo Reisenberger de Souza. **Análise e triagem de tumor benigno de mamas a partir de imagem infravermelha.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UFPR, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Orientador: Jose Viriato Coelho Vargas.
-
- Vilmar Graciano. **Modelagem e simulação de motores a ignição por compressão (ICO) com misturas de diesel, gás natural e biodiesel.** 2012. Tese (Doutorado em Programa de Pós-Graduação Em Eng Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, . Orientador: Jose Viriato Coelho Vargas.
-
- Amanda Cristina de Oliveira **Produção de biomassa de microalgas *Scenedesmus* sp em efluente de bovinocultura biodigerido** 2013 Dissertação de Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - UFPR, Orientador: André B Mariano
-
- Elise Meister Sommer. **Modelagem, simulação e otimização de células de combustível de membrana alcalina.** 2012. Tese (Doutorado em Programa de Pós-Graduação Em Eng Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Orientador: Jose Viriato Coelho Vargas.
-
- Débora Andreatta **Reutilização do resíduo de microalgas para produção de biomassa de microalgas para biocombustíveis** Início 2012 Dissertação de Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - UFPR, Orientador: André B Mariano,
-
- Bruno Miyawaki **Purificação de Biogás através de cultivo de microalgas em fotobiorreatores** Início 2012 Dissertação de Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - UFPR, Orientador: André B Mariano,
-
- Aline Bescrovaine Pereira **Produção de biomassa e de lipídeos por cultivo misto de microalgas suplementado com CO₂** 2013 Dissertação de Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - UFPR, Orientador: David Mitchell, Co-orientador: André B Mariano
-
- Luiza Schroeder **Obtenção de ácidos graxos de biomassa úmida de microalgas através de saponificação** 2013 Dissertação de Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - UFPR, Orientador: André B Mariano
-
- Dhyogo Miléo Taher **Biodiesel de microalgas cultivadas em dejetos suíno biodigerido** 2013 Dissertação de Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - UFPR, Orientador: André B Mariano
-
- Anne Caroline Defranceschi Oliveira **Síntese enzimática do biodiesel de microalgas a partir de lipases produzidas por fungos endofíticos** 2013 Dissertação de Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - UFPR, Orientador: André B Mariano
-
- Maria Judite Dzman **Reutilização de água no cultivo de microalgas** 2013 Dissertação de Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - UFPR, Orientador: David Alexander Mitchell, Co-orientador: André B Mariano
-
- Anderson Cardoso Sakuma **Desenvolvimento e análise experimental de biodigestores modulares de baixo tempo de residência** 2013 Dissertação de Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - UFPR, Orientador: José Viriato Coelho Vargas, Co-orientador: André B Mariano
-
- Maura Harum Sugai **Modelagem matemática de coluna de gaseificação de fotobiorreatores tubulares para cultivo de microalgas** 2012 Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - UFPR, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Orientador: David Alexander Mitchell
-
- Camila Agner D' Aquino **Desenvolvimento de tubos transparentes para fotobiorreatores compactos** 2012 Dissertação de Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - UFPR, Orientador: José Viriato Coelho Vargas
-
- Jacqueline de Souza Lemos **Desenvolvimento de sistema de tratamento e reciclagem de meio de cultivo de microalgas para produção de biodiesel** 2012 Dissertação de Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - UFPR, Orientador: José Viriato Coelho Vargas Co-orientador: André B Mariano
-
- Keli Cristiane Correia Moraes **Análise e desenvolvimento de aquicultura da microalga *Phaeodactylum tricornutum* UTEX 640 em crescimento autotrófico e mixotrófico em fotobiorreatores compactos** 2011 Dissertação de Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - UFPR, Orientador: José Viriato Coelho Vargas Co-orientador: André B Mariano
-
- Enio Carstens Telles **Modelagem, simulação e desenvolvimento de um sistema trigerador (calor, eletricidade e frio) alimentado por biodiesel de microalgas** 2011 Dissertação de Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - UFPR, Orientador: José Viriato Coelho Vargas
-
- Alexandre Stall **Desenvolvimento e implementação de um fotobiorreator compacto para cultivo de microalgas *Phaeodactylum tricornutum* UTEX-640** 2010 Dissertação de Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - UFPR, Orientador: José Viriato Coelho Vargas
-
- Daiane Maria Rogenski Penteado **Estudos de otimização do meio de cultura para a microalga *Phaeodactylum tricornutum* para produção de lipídios** 2010 Dissertação (Mestrado em Ciências (Bioquímica) - UFPR, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Orientador: David Alexander Mitchell
-
- Diniara Soares **Avaliação do crescimento celular e da produtividade de lipídeos de microalgas marinhas em diferentes regimes de cultivo** 2010 Dissertação (Mestrado em Ciências (Bioquímica) - UFPR, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Orientador: David Alexander Mitchell
-
- Rui Miguel Carvalho Júnior **Desenvolvimento e análise energética do processo de obtenção do biodiesel de microalgas por metanólise *in situ*** 2010 Dissertação de Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - UFPR, Orientador: José Viriato Coelho Vargas Co-orientador: Luiz Pereira Ramos
-
- Robert Luis Lara Ribeiro **Modelagem numérica do crescimento de algas em tanques de cultivo** 2010 Dissertação de Mestrado em Modelagem Computacional - Universidade Federal do Rio Grande Co-orientador: José Viriato Coelho Vargas
-
- Wellington Balmant **Concepção, construção e operação de um biodigestor e modelagem matemática da biodigestão anaeróbica** 2008 Dissertação de Mestrado em Programa interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia - UFPR Orientador: David Alexander Mitchell, Co-orientador: José Viriato C Vargas
-

15 TRABALHOS DE CONCLUSÃO DE CURSO CONCLUÍDOS

Beatriz Santos **Redução do custo da produção de biomassa microalgal como matéria prima para biodiesel** Início: 2013 Trabalho de conclusão de curso de graduação em Ciências Biológicas - UFPR Orientador: André B Mariano, Co-orientador: Thales Ricardo Cipriani

Roberto Nobuyoshi Yamada Júnior. **Caracterização do protótipo refrigerador por absorção RANILKO.** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná. Orientador: Jose Viriato Coelho Vargas.

Felipe Leonardo de Moura Merss. **Desenvolvimento de um sistema de acoplamento entre um fotobiorreator e um trigerador.** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná. Orientador: Jose Viriato Coelho Vargas.

José Viriato Coelho Vargas **Modelagem e simulação de processo de geração de hidrogênio via cultivo de microalgas em fotobiorreatores compactos** 2012 Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) - UFPR Orientador: David Alexander Mitchell

Diego Correa de Oliveira **Cultivo semicontínuo de uma microalga do gênero Scenedesmus em fotobiorreator tubular compacto para produção de biodiesel e caracterização do sistema de cultivo** 2013 Orientador: David Alexander Mitchell, Co-orientador: André B Mariano

Bruno Miyawaki **Análise de Diferentes Meios de Cultivo para Crescimento da Microalga Scenedesmus sp com foco no aumento da produtividade de biomassa e diminuição dos custos** 2011 Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bioprocessos e Biotecnologia) - Universidade Tuiuti do Paraná Orientador: André B Mariano

Guilherme Luis Pellin **Produção de microalgas em águas degradadas com resíduos de dejetos suínos** 2011 Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bioprocessos e Biotecnologia) - Universidade Tuiuti do Paraná Orientador: André B Mariano

Fernanda Diniz Pugsley **Análise e desenvolvimento de meios de cultura alternativo para microalgas com dejetos bovinos para desenvolvimento de biocombustível** 2011 Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bioprocessos e Biotecnologia) - Universidade Tuiuti do Paraná Orientador: André B Mariano

Élio Renato Würfel **Cultivo de microalgas em fotobiorreator para tratamento de água contendo dejetos humanos por captura de nutrientes e produção de biomassa para biocombustíveis** 2011 Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Biomedicina) - Universidade Tuiuti do Paraná Orientador: André B Mariano

Maria Judite Dzuman **Avaliação da composição da biomassa de microalgas marinhas para aplicações industriais na área de biotecnologia** 2010 Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia de Bioprocessos e Biotecnologia) - Universidade Tuiuti do Paraná Orientador: André B Mariano

Janaína Alana Bosa **Avaliação da composição de microalgas de água doce e salgada com foco em aplicações biotecnológicas** 2010 Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia de Bioprocessos e Biotecnologia) - Universidade Tuiuti do Paraná Orientador: André B Mariano

Rui Tsai **Secador de algas por meio do uso de gases de exaustão de motor** 2011 Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - UFPR Orientador: Jose Viriato Coelho Vargas

Gustavo Hiroshi Suguiy **Secador de algas por meio do uso de gases de exaustão de motor** 2011 Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - UFPR Orientador: Jose Viriato Coelho Vargas

Marco Aurélio Gehlen **Análise estrutural e térmica de um fotobiorreator** 2011 Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - UFPR Orientador: Jose Viriato Coelho Vargas

Erick Hernan Boschilha Lastra **Análise estrutural e térmica de um fotobiorreator** 2011 Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - UFPR Orientador: Jose Viriato Coelho Vargas
